

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNÉE 1961

THÈSE

N° 486

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'État)

PAR

Antoine LAVILLE

né le 1er Janvier 1934 à PARIS

Présentée et soutenue publiquement le :

COUT ENERGETIQUE DU TRAVAIL STATIQUE

Président: M. BARGETON, Professeur .

ÉDITIONS A. G. E. M. P. — 8, RUE DANTE

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNÉE 1961

THÈSE

N°

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'État)

PAR

Antoine LAVILLE

né le 1er Janvier 1934 à PARIS

Présentée et soutenue publiquement le :

COUT ENERGETIQUE DU TRAVAIL STATIQUE

Président: M. BARGETON, Professeur .

ÉDITIONS A. G. E. M. P. — 8, RUE DANTE

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

PROFESSEURS

PROFESSEURS HONORAIRES :

MM. Aubin (A.), Bénard (H.), Bulliard (H.), Cadenat (F.), Chabrol (E.), Champy (C.), Debré (R.), Gastinel (P.), Guillain (G.), Halphen (E.), Hazard (R.), Heuyer (G.), Lantuejoul (P.), Laroche (G.), Lévy-Solal (E.), Lian (C.), Loeper (M.), Marion (G.), Mathieu (P.), Mocquot (P.), Mondor (H.), Monod (R.), Moreau (R.), Olivier (E.), Pasteur Vallery-Radot, Petit-Dutaillis, Richet (C.), Strohl (A.), Tanon (L.).

DOYEN Léon BINET.
Membre de l'Institut

ASSESEUR. Jean VERNE.

I. — PROFESSEURS

	MM.
Anatomie	DELMAS (A.)
Anatomie pathologique	DELARUE (J.)
Anesthésiologie	BAUMANN (J.)
Biochimie médicale	JAYLE (M. F.)
» » (Prof: à titre personnel)	ETTORI (J.)
» » (Prof: à titre personnel)	SCHAPIRA (G.)
Biologie appliquée à l'Education physique et aux Sports	CHAILEY-BERT (P.)
Biologie médicale	FAUVERT (R.)
» » (Prof: à titre personnel)	BOURLIERE (F.)
Cancérologie médicale et sociale	BERNARD (J.)
Clinique carcinologique chirurgicale (Necker)	REDON (H.)
Clinique cardiologique (Broussais)	MOUQUIN (M.)
	SICARD (A.)
Cliniques chirurgicales	N.
	PATEL (J.)
	GORDIER (G.)
	GOSSET (J.)
	MOULONGUET (P.)
	LORTAT-JACOB (J.-L.)
	FÈVRE (M.)
Clinique de chirurgie infantile et orthopédique (Enfants-Malades)	MERLE D'AUBIGNÉ (R.)
Clinique chirurgicale orthopédique et réparatrice (Cochin)	GAUDART-D'ALLAINES (F. de)
Clinique de chirurgie cardio-vasculaire (Broussais)	MATHEY (J.)
Clinique de chirurgie pleuro-pulmonaire (Laënnec)	DECOURT (J.)
Clinique endocrinologique (Pitié)	LAMY (M.)
Clinique de génétique médicale (Enfants-Malades)	FUNGCK-BRENTANO (P.)
Clinique gynécologique (Broca)	DEGOS (R.)
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques (St-Louis)	CATHALA (J.)
Clinique des maladies des enfants (Enfants-Malades)	MOLLARET (P.)
Clinique des maladies infectieuses (Claude-Bernard)	DELAY (J.)
Clinique des maladies mentales et de l'encéphale (St-Anne)	HAMBURGER (J.)
Clinique des maladies métaboliques (Necker)	MARCHAL (G.)
Clinique des maladies du sang (Broussais)	N.
Clinique des maladies du système nerveux (Salpêtrière)	LENÈGRE (J.)
	SOULIÉ (P.)
Cliniques médicales	JUSTIN-BESANÇON (L.)
	BROUET (G.)
	BARIÉTY (M.)
	DREYFUS (G.)
	KOURILSKY (R.)
Clinique médicale d'hydrologie thérapeutique et climatologie (Bichat)	DEBRAY (C.)
Clinique médicale propédeutique (Broussais)	GENNES (L. de)
Clinique médico-sociale du diabète sucré et des maladies de la nutrition (Hôtel-Dieu)	DEROT (M.)
Clinique de neuro-chirurgie (Pitié)	DAVID (M.)
Clinique neurologique (Salpêtrière)	GARCIN (R.)
Cliniques obstétricales	LACOMME (M.)
	MERGER (R.)
Clinique obstétricale et gynécologique (Port-Royal)	VARANGOT (J.)
Clinique ophtalmologique (Hôtel-Dieu)	RENARD (G.)
Clinique oto-rhino-laryngologique (Lariboisière)	AUBRY (M.)
Clinique de pédiatrie et de puériculture (St-Vincent-de-Paul)	LELONG (M.)
Clinique de pédiatrie Sociale (Enfants-Malades)	MARIE (J.)
Clinique de pneumo-phthisiologie (Laënnec)	BERNARD (E.)
Clinique psychiatrique infantile (Salpêtrière)	MICHAUX (L.)
Clinique de rhumatologie médicale et sociale (Cochin)	COSTE (F.)
Clinique stomatologique (Pitié)	DECHAUME (M.)
Clinique thérapeutique chirurgicale (Vaugirard)	N.
Clinique thérapeutique médicale (St-Antoine)	LEMAIRE (A.)
Clinique urologique (Cochin)	N.
Embryologie	GIROUD (A.)
» (Prof: à titre personnel)	TUCHMANN-DUPLESSIS (H.)
Histoire de la médecine et de la chirurgie (Lariboisière)	SÈZE (S. de)
Histologie	VERNE (J.)

Hygiène et clinique de la première enfance (Trousseau)
 Hygiène et médecine préventive (Prof^r à titre personnel)
 » » »
 Médecine du Travail
 Médecine légale
 Microbiologie (Bactériologie et virologie)
 Parasitologie (Prof^r à titre personnel)
 » » »
 Pathologie chirurgicale (Prof^r à titre personnel)
 » » »
 Pathologie exotique
 Pathologie expérimentale et comparée
 Pathologie médicale
 Pathologie respiratoire
 Pathologie et thérapeutique générales
 Pharmacologie (Prof^r à titre personnel)
 » » »
 Physiologie (Prof^r à titre personnel)
 » » »
 Physiologie et pathologie obstétricale
 Physique médicale (Prof^r à titre personnel)
 » » »
 Radiologie médicale
 Technique chirurgicale et Chirurgie expérimentale
 Thérapeutique

MM.
 TURPIN (R.)
 JOANNON (P.)
 DEPARIS (M.)
 DESOILLE (H.)
 PIEDELIÈVRE (R.)
 FASQUELLE (R.)
 GALLIARD (H.)
 BRUMPT (L. C.)
 COUVELAIRE (R.)
 LAURENCE (G.)
 LAVIER (G.)
 MERKLEN (F.-P.)
 MILLIEZ (P.)
 TURIAF (F.)
 BOUDIN (G.)
 CHEYMOL (J.)
 LÉVY (Mlle J.)
 BINET (L.)
 BARGETON (D.)
 PARROT (J)
 LEPAGE (F.)
 DOGNON (A.)
 DJOURNO (A.)
 DESGREZ (H.)
 LÉGER (L.)
 CONTE (M.)

II. — PROFESSEURS SANS CHAIRE, PROFESSEURS AGRÉGÉS ET MAÎTRES DE CONFÉRENCES - AGRÉGÉS

MM.
 Anatomie. { CABROL (C.)
 COUINAUD (C.)
 OLIVIER (G.)
 GAUTHIER-VILLARS (Mlle P.)
 pr. s. ch.
 BUSSER (F.)
 Anatomie pathologique . . . { GOUYGOU (Ch.)
 ORCEL (L.)
 PAILLAS (J.)
 Anesthésiologie. VOUREH (G.)
 Bactériologie. { BARBIER (P.)
 CHRISTOL (D.)
 TOURNIER (P.)
 Biochimie médicale. { DESGREZ (P.), pr. s. ch.
 POLJANSKI (J.), m. conf.
 Biologie appliquée à l'Éducation
 Physique et aux Sports . . . PLAS (F.)
 Carcinologie. { DENOIX (P.)
 MATHE (G.)
 Dermato-Syphiligraphie. . . DUPERRAT (B.)
 Electro-Radiologie LEDOUX-LEBARDE (G.)
 Hématologie { BILSKI-PASQUIER (G.)
 DAUSSET (J.)
 COUJARD (R.) pr. s. ch.
 Histologie. { MAROIS (M.)
 RACADOT (J.)
 Hydrologie CORNET (A.)
 Hygiène. { BOYER (J.), pr. s. ch.
 CORRE-HURST (Mme L.)
 Maladies infectieuses . . . { BASTIN (R.)
 DUPONT (V.)
 DEROBERT (L.), pr. s. ch.
 Médecine légale. { HADENGUE (A.)
 FOURNIER (E.)
 GUENIOT (M.)
 Médecine du travail. . . . ALBAHARY (G.)
 Neurologie. LHERMITTE (F.)
 GRANJON (A.)
 HERVET (E.)
 LE LORIER (G.)
 Obstétrique { MORIN (P.)
 MUSSET (R.)
 ROBEY (M.)
 THOYER-ROZAT (J.)

MM.
 Ophtalmologie. { BRÉGEAT (P.)
 SARAUX (H.)
 Orthopédie. { JUDET (R.)
 RAMADIER (J.)
 Oto-rhino-Laryngologie . . DEBAIN (J.)
 Parasitologie. CHABAUD (A.)
 BARCAT (J.)
 BINET (J.-P.)
 CAUCHOIX (J.)
 CHATELIN (G.-L.)
 DUBOST (Ch.)
 DUBOST (Cl.)
 FAUREL (J.)
 Pathologie chirurgicale . . { FLABEAU (F.)
 GERMAIN (A.)
 LOYGUE (J.)
 MERCADIER
 PERROTIN (J.)
 ROBERT (H.)
 THOMERET (G.)
 Pathologie exotique . . . SCHNEIDER (J.)
 Pathologie expérimentale . { CROSNIER (J.)
 HARTMANN (L.)
 LÉPER (J.)
 MAURICE (J.)
 RICHE (G.)
 AUSSANNAIRE (M)
 BOUR (H.)
 BOUVIER (J.)
 BOUVRAIN (Y.)
 BRICAIRE (H.)
 BRISAUD (H.)
 BROCARD (H.)
 BUGE (A.)
 CASTAIGNE (P.), m. conf.
 CATINAT (J.)
 CONTAMIN (F.)
 Pathologie médicale. . . . { COURY (G.)
 FREZAL (J.)
 HOUSSET (E.)
 LAROCHÉ (Cl.)
 LESOBRE (R.)
 MACREZ (G.)
 NICK (J.)
 PEQUIGNOT (H.) pr. s. ch.
 ROYER (P.)
 WOLFROMM (R.)

	MM.		MM.
Pédiatrie-Puériculture . . .	{ JOSEPH (R.)	Pneumo phtisiologie . . .	KREIS (B.)
	{ MANDE (R.)		PICHOT (P.)
	{ MOZZICONACCI (P.)		Psychiatrie
	{ POLONOVSKI (G.)		Psychiatrie infantile
	{ ROSSIER (A.)	Stomatologie	DELBARRE (F.)
Pharmacologie	{ BOISSIER (J.)		{ CERNÉA (P.)
	{ LECHAT (P.)		{ CHAPUT (M ^{me} A.), m.c. agr.
Physiologie	{ DEJOURS (P.)		{ GRELLET (M.)
	{ GOUGEROT (L.), m. conf.	Thérapeutique	{ CHASSAGNE (P.)
Physique médicale	{ pr. s. ch.		{ LAMOTTE (M.)
	{ KELLERSHOHN	Urologie	QUENU (L.)

III. — PROFESSEURS SANS CHAIRE ET AGRÉGÉS CHARGÉS DE COURS DE CLINIQUE ANNEXE à titre permanent.

	MM.		MM.
Anatomie	DEBEYRE	Clinique obstétricale . . .	{ GRASSET (J.)
Clinique chirurgicale . . .	{ ABOLKER (P.)	Clinique ophtalmologique .	{ MAYER (M.)
	{ ANELINE (A), pr. s. ch.		{ RAVINA (J.)
	{ HUGUIER (J.)	Clinique oto-rhino-laryngo-	{ DESVIGNES (P.)
	{ OLIVIER (C.)		{ OFFRET (G.)
	{ PADOVANI (P.)	Clinique pédiatrique et pué-	MADURO (R.)
	{ POILLEUX (F.)		
Clinique médicale	{ ROUX (M.)	Clinique psychiatrique . .	BARUK (H.)
	{ VERNE (J.-M.)		
	{ DOMART (A.)	Clinique urologique . . .	KUSS (R.)
	{ PERRAULT (M.)	Médecine légale	GAULTIER
	{ RAMBERT (P.)		
	{ THIEFFRY (S.)		

IV. — PROFESSEURS DÉTACHÉS DANS LES UNIVERSITÉS ÉTRANGÈRES

Bactériologie	HAUDUROY (P.) Pr. s. ch.
Pathologie chirurgicale	RUDLER (J.) Pr. s. ch.

V. — CHARGÉS DE COURS D'HYGIÈNE SCOLAIRE ET UNIVERSITAIRE

Secrétaire général de la Faculté . .	M. LENA (J.)
Secrétaires	M ^{me} BEURLAND (H.), M ^{lle} CHAINTREUIL (G.), M ^{me} ROCHE (L.)
Conservateur en Chef	M. le Docteur HAHN (A.)
Conservateur	Mlle DUMAITRE (P.)
Bibliothécaires	{ Mmes CONTET (J.), FORGET (F.),
	{ Mlles LAURENT (H.), LE NOIR (G.), QUIÉVREUX (E.)

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'Ecole a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

A Monsieur le Professeur BARGETON
Professeur de Physiologie appliquée à la
Faculté de Médecine de Paris

qui nous a fait le grand
honneur de bien vouloir accepter
de présider cette thèse.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

A Monsieur le Professeur C. SOULA

Commandeur de la Légion d'Honneur

dont l'accueil bienveillant
et l'aide efficace nous ont
permis de réaliser ce travail.

A Monsieur le Professeur J. SCHERRER
Maître de Conférence à la Faculté de
Médecine de Paris.

qui nous a proposé le sujet de cette
thèse, qui nous a guidé dans sa réa-
lisation et dont l'enseignement et
les conseils nous ont été d'une aide
constante.

A Monsieur le Docteur H. MONOD

Chef de travaux à l'Ecole Pratique des
Hautes Etudes,

Assistant de Physiologie à l'Ecole
Nationale de Médecine et de Pharmacie
d'AMIENS,

qui nous a initié aux problèmes
du travail musculaire et dont
la grande expérience et l'aide
de chaque instant nous ont été
d'un appui très précieux.

A tous les membres du Laboratoire qui nous ont apporté leur collaboration dans la réalisation de cette étude :

Madame F. HUARD, technicienne du C.N.R.S. qui a effectué toutes les mesures expérimentales et leur dépouillement et assuré la partie statistique de ce travail.

Madame S. MANQUENE , technicienne du C.N.R.S. qui nous a apporté son aide au cours des expériences et dans le dépouillement des résultats.

Monsieur P. DELAMARE, aide de laboratoire du C.N.A.M. qui a réalisé l'appareillage mécanique de l'expérimentation.

Monsieur F. CARRE qui a établi les courbes et schémas de cette étude.

Mademoiselle J. GOMIS qui a assuré la recherche bibliographique et la présentation matérielle de ce texte.

Nous tenons à les assurer de notre sincère gratitude.

COUT ENERGETIQUE DU TRAVAIL STATIQUE

I N T R O D U C T I O N

Le travail statique mérite une place particulière dans l'étude de la contraction musculaire; Il est en effet une composante parfois importante de l'activité volontaire de l'Homme et diffère essentiellement du travail dynamique par l'apparition beaucoup plus rapide de la fatigue. CACHCART pouvait écrire en 1923 que "c'est la composante statique d'un effort musculaire qui détermine si le travail est pénible ou non".

Contrairement au travail dynamique, aucune unité physique ne permet de mesurer le travail statique dont le terme même a pu prêter à discussion (v. MONOD, 1956). Cette difficulté peut expliquer le peu d'études qui ont été consacrées à ce sujet.

Cependant, quelques recherches récentes ont abordé l'étude du travail statique sous un jour nouveau, à l'aide des notions de seuil d'épuisement local, de temps-limite et de travail-limite, notions proposées par J. SCHERRER et coll. (1953, 1954 et 1955); ont été notamment précisées : la capacité de travail statique d'un groupe musculaire synergique chez l'Homme (MONOD et SCHERRER, 1957; SCHERRER et coll. 1960); les variations de la pression artérielle et du pouls au cours de la contraction isométrique continue (MONOD et coll. 1956); l'aspect du tracé électromyographique au cours de celle-ci (MONOD, 1956).

L'étude des échanges respiratoires au cours du travail statique n'a pas fait l'objet d'investigations récentes (v. SCHERRER et MONOD, 1960) et nous nous sommes proposés de compléter les données actuelles sur les modifications respiratoires et le coût énergétique de la contraction isométrique en tentant de préciser les modalités de comportement de groupes musculaires de fonction différentes.

Avant d'aborder l'exposé de nos résultats personnels et leur discussion, nous rappellerons brièvement les travaux effectués dans ce domaine et la technique utilisée.

RAPPEL HISTORIQUE

Nous ne nous proposons pas de faire un historique complet des recherches consacrées au travail statique; nous renvoyons pour cela à KAYSER (1947 et 1948) et à MONOD (1956); nous rappellerons seulement quelques résultats obtenus au cours de différentes études concernant le coût énergétique de la contraction statique chez l'Homme, résultats dont certains seront repris lors de la discussion.

Les premières mesures dans ce domaine ont été effectuées par CHAUVEAU et TISSOT (1896-97) qui ont étudié la contraction isométrique continue d'un groupe musculaire synergique. Leur conclusion est qu'à charge constante, le coût énergétique est proportionnel au degré de raccourcissement du muscle et qu'à raccourcissement constant, celui-ci est proportionnel à la charge. Un peu plus tard, JOHANSSON (1901) étudie la contraction isométrique intermittente, aboutissant à des résultats voisins de ceux de CHAUVEAU et TISSOT : le rejet de CO_2 est proportionnel à la durée totale des contractions. JOHANSSON et KORAEN (1902) notent, de plus, que la mise en tension du muscle s'accompagne d'une dépense plus élevée et souligne l'augmentation rapide des échanges respiratoires avec la fatigue.

L'étude de la relation entre le coût énergétique et les deux variables - charge et durée - de la contraction statique est reprise par plusieurs auteurs : BORNSTEIN et POHER (1903) montrent une augmentation plus rapide de la consommation d'Oxygène que de la charge et de la durée de contraction. FRUMERIE (1913) montre que le

rejet de CO_2 est directement proportionnel à la durée de la contraction si celle-ci ne dépasse pas 60 secondes.

Faisant suite aux travaux de LINDHARD (1920) montrant l'augmentation de la consommation d'oxygène après l'arrêt du travail statique continu, les travaux de BEDFORD et coll. (1933), méritent d'être rappelés. Dans leurs investigations les sujets, assis, poussent de façon intermittente ou continue sur un ressort, avec les membres supérieurs; la durée de la contraction, la fréquence et la force de poussée sont les principales variables étudiées. Leurs résultats peuvent être ainsi résumés :

- 1 - Le coût énergétique est en relation linéaire avec la durée de la contraction:
 $Q = a + bt$.
- 2 - Le coût énergétique augmente plus vite que la charge : $Q = a F^x$.

Etudiant d'autre part les variations de l'équivalent ventilatoire de l' O_2 (rapport de l'oxygène consommé à la ventilation) BEDFORD et coll. notent les faits suivants :

- 1 - Pour une même consommation d'oxygène, la ventilation augmente, pour une forte charge, avec la durée de la contraction.
- 2 - Pour des contractions intermittentes brèves (0,5 s.), l'équivalent ventilatoire de l'oxygène baisse pendant le travail, puis augmente rapidement après celui-ci.
- 3 - En contractions continues, l'équivalent ventilatoire augmente pendant le travail et resté élevé pendant la première minute de la récupération.
- 4 - Le travail statique continu s'accompagne généralement d'hyperventilation, mais

celle-ci n'apparaît pas immédiatement.

Le phénomène d'effort comportant un blocage thoracique est constant au cours de contractions statiques : KEKTSCHEW et BRAITZEWA (1930) l'ont mis en évidence par des enregistrements pneumographiques. Ce fait explique l'effet LINDHARD décrit en 1920 par cet auteur, et retrouvé depuis, par de nombreux expérimentateurs, notamment par MARSCHAK (1931), BEDFORD et coll. (1933) et plus récemment par CLARKE (1960). Nous renvoyons, d'ailleurs, en ce qui concerne les adaptations ventilatoires au cours du travail statique, au rapport de DEJOURS (1959).

Mentionnons enfin, qu'un certain nombre de travaux ont été consacrés à la mesure du coût physiologique des contractions musculaires de posture, montrant la relative faiblesse de celui-ci (v. BOUISSET, MONOD et PELOSSE, 1959).

T E C H N I Q U E

Notre étude expérimentale porte sur la mesure de la consommation d'oxygène au cours du travail statique réalisé par un groupe musculaire synergique. Nous avons choisi d'étudier la contraction isométrique intermittente parce qu'une contraction continue se prête mal à la détermination simultanée des échanges respiratoires; ceux-ci exigent en effet une durée minimale d'expérience, alors que la contraction statique continue ne peut être poursuivie pendant un temps très long en raison de l'ischémie locale.

Dans un premier temps, nous avons recherché le coût énergétique de la contraction isométrique en fonction de la durée de celle-ci et de la force mise en jeu. Dans ce but, nous avons étudié un travail statique comportant des périodes de contraction séparées par des périodes de repos de durée à peu près égale, et nous avons fait varier la force et la fréquence des contractions. Mais une contraction isométrique comporte une phase de mise en tension et une phase de relâchement entre lesquelles se trouve intercalée une phase de maintien de la tension : nous avons essayé de déterminer le coût énergétique se rapportant à ces différentes phases. Il est évident que la technique utilisée doit permettre d'effectuer la contraction (mise en tension, maintien de la tension et relâchement) sans déplacement, pour éviter tout travail dynamique dont le coût est nettement plus élevé.

Dans un deuxième temps, nous avons comparé deux groupes musculaires de fonction différente : le biceps brachial et ses muscles synergiques qui ont une fonction phasique : ils rentrent dans le cadre de la vie de relation et ils sont représentatifs de ce que l'on nomme communément la force musculaire de l'Homme; le triceps sural qui a une fonction tonique : il participe au maintien de la posture debout et à la marche.

1 - METHODE D'ETUDE ET TECHNIQUE

Les moyens techniques utilisés sont d'une part un appareillage mécanique permettant de réaliser des contractions intermittentes strictement isométriques, d'autre part des appareils de mesure et d'enregistrement des échanges respiratoires, de la fréquence cardiaque, des potentiels électriques des muscles en activité et des forces mises en jeu.

A - APPAREILLAGE PERMETTANT D'EFFECTUER LE TRAVAIL STATIQUE INTERMITTENT.

Le dispositif original que nous avons utilisé (voir fig.1) est constitué d'un plateau rigide, rectangulaire (1), mobile autour d'un axe horizontal appartenant à l'un de ses petits côtés (2). Un moteur synchrone (3) entraîne un arbre à came (4) qui mobilise le plateau entre deux positions extrêmes : en position haute (A), le plateau est horizontal; il s'abaisse progressivement pour occuper une position basse (B), d'où il regagne la position initiale (A).

La forme de la came fixe le rapport des durées pendant lesquelles le plateau occupe chacune des deux positions. Entre le moteur et l'arbre à came, un système d'engrenage (5) est interposé. En modifiant le rapport des pignons on peut faire varier la vitesse de rotation de la came.

Le segment de membre, maintenu par la contraction du groupe musculaire étudié, est relié par un système de transmission à une charge posée sur le plateau. Lorsque la charge occupe la position haute, le groupe musculaire ne doit effectuer aucun travail et ceci correspond à la période de repos. Lorsque le plateau s'abaisse, le groupe musculaire doit se contracter pour que la charge soit maintenue à son niveau initial. Lorsque le plateau remonte, il

libère le groupe musculaire de la tension qui lui était imposée.

Un signal auditif précède de 0,1 seconde l'abaissement et le relèvement du plateau, avertissant le sujet du début et de la fin de la période de travail.

Cependant, les déplacements de la charge sont inévitables et ceux-ci sont enregistrés à l'aide d'un compte-tours fixé sur une poulie de réflexion du câble du système de transmission.

B - APPAREILS DE MESURE ET D'ENREGISTREMENT.

1 - Consommation d'oxygène.

La consommation d'oxygène est déterminée par la méthode du circuit ouvert, comprenant la mesure du volume ventilé et l'analyse des gaz expirés.

Nous ne ferons que rappeler cette technique déjà précisée par SOULA, SCHERRER et MONOD (1960) : le sujet inspire de l'air atmosphérique contenu dans deux gazomètres de TISSOT, de 200 litres chacun, fonctionnant alternativement et possédant un dispositif inscripteur des volumes ventilés. L'expiration se fait dans une batterie de sacs de DOUGLAS, dans lesquels on a fait préalablement le vide.

Le sujet respire par l'intermédiaire d'un masque de caoutchouc léger dont la forme est adaptée à celle du visage, et de tubulures légères et de gros diamètre (construites suivant des normes précisées par le Pr. Ag. DEJOURS). Deux soupapes à faible résistance assurent dans les tubulures la circulation de l'air dans le sens gazomètres-sujet et sujet-sacs de DOUGLAS.

Chaque sac de DOUGLAS recueille le volume expiré au cours d'une période donnée; il est

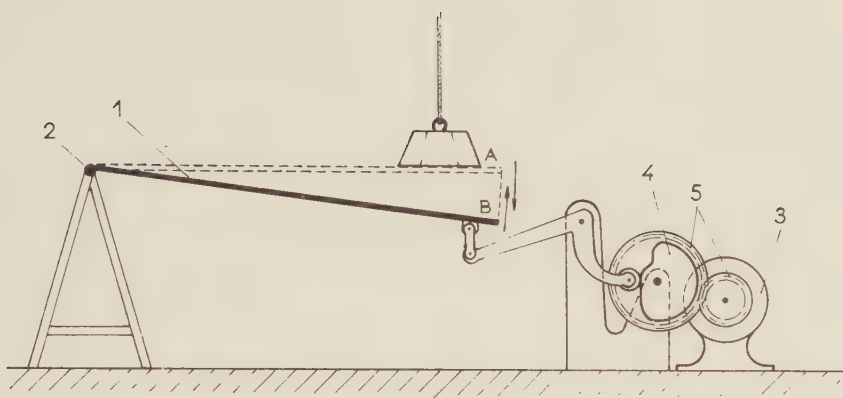


Fig. 1

Schéma du dispositif mécanique utilisé.

Un plateau rigide, rectangulaire (1) est mobilisé autour d'un axe horizontale appartenant à l'un de ses petits côtés (2) par un arbre à came (4) ; celui-ci est entraîné par l'intermédiaire d'un engrenage (5) par un moteur synchrone (3). Le déplacement du plateau se fait à intervalle régulier, fixé par la forme de la came et le rapport de l'engrenage, entre deux positions : la position haute (A) correspond à la période de repos, la position basse (B) correspond à la période de travail, le sujet maintenant la charge au niveau de la position haute.

ensuite connecté à un circuit d'analyse; une pompe de faible débit assure la circulation de l'air expiré à travers ce circuit qui comprend un dessiccateur - (gel de silice coloré), un analyseur de CO_2 à infra rouge - type ONERA - (voir LUFT, 1956) qui donne le pourcentage de CO_2 dans le gaz analysé ($F_{\text{E}\text{CO}_2}$), puis un oxymètre, type BECKMANN, modèle C ($P_{\text{E}\text{O}_2}$) (v. PAULING et coll. 1946) donnant la pression partielle de l'oxygène ($P_{\text{E}\text{O}_2}$). Un débitmètre est placé en fin de circuit. L'analyse des gaz expirés est faite immédiatement après qu'ils ont été recueillis; les risques de diffusion du CO_2 objectivés récemment dans une étude critique de SHEPHARD (1955), sont donc réduits au minimum. Les lectures sont faites après 4 minutes de passage de l'air dans le circuit d'analyse et après arrêt de la pompe. Ce temps de passage est nécessaire, mais suffisant, lorsqu'on utilise du gel de silice comme dessiccateur. En effet, le CO_2 de l'air expiré se fixe partiellement sur celui-ci et l'équilibre n'est pas immédiat.

Le dépouillement des résultats est effectué suivant la technique de MARGARIA et coll. (1954); cependant, comme le CO_2 n'est pas absorbé avant le passage de l'air expiré dans l'oxymètre ainsi que le prévoient ces auteurs, on calcule la pression partielle qu'exercerait l'oxygène dans l'air expiré sec et privé de CO_2 ($P'_{\text{E}\text{O}_2}$) à partir de la pression partielle de l'oxygène réellement mesurée dans l'air expiré ($P_{\text{E}\text{O}_2}$) en tenant compte du pourcentage de CO_2 ($F_{\text{E}\text{CO}_2}$) dans celui-ci (1):

$$P'_{\text{E}\text{O}_2} = \frac{P_{\text{E}\text{O}_2}}{(1 - F_{\text{E}\text{CO}_2})}$$

Après cette correction qui permet de connaître ($P'_{\text{E}\text{O}_2}$), le nomogramme de MARGARIA (fig.2) peut être utilisé et donne le nombre de millilitres (ml

(1) Note : Les symboles figurant ici sont ceux internationalement admis et utilisés (voir COMROE et coll. 1959)

d'oxygène consommés par litre d'air ventilé (V_{O_2}). Le dépouillement du tracé de l'air inspiré (V_T) ré dans les gazomètres de TISSOT permet de connaître, pour la période correspondant à l'analyse des gaz, le volume d'air ventilé (V_T) en litre par minute (l/mn), exprimé en unité A T P S.

Le produit du chiffre lu sur le nomogramme (V_{O_2} en ml/l) par le volume ventilé (V_T en l/mn) donne la consommation d'oxygène (V_{O_2} en $\frac{V_{O_2}}{V_T}$ ml/mn). Le nomogramme est établi de façon à donner directement le résultat en unité S T P D, en supposant une température de l'air inspiré de 20°. Si la température réelle s'écarte de 20° on effectue une correction de volume de + 0,5 % par degré au-dessous de 20°, et de - 0,5 % par degré au-dessus de 20°.

2 - Autres mesures effectuées.

La fréquence cardiaque a été enregistrée par électrocardiographie, à l'aide d'une dérivation classique des membres, en utilisant un appareil électromagnétique à plumes. Le dépouillement a été effectué par comptage des complexes rapides, ramenés, en fonction de la vitesse de déroulement de la bande d'enregistrement, à l'unité de temps.

L'activité électrique du groupe musculaire étudié a été explorée par deux électrodes métalliques de surface; celles-ci sont appliquées sur la peau, dégraissée préalablement à l'éther, en regard des muscles actifs et maintenues en place par du collodion. Les potentiels d'action musculaire ainsi recueillis sont amplifiés par une chaîne de quatre étages montés en push-pull, connectés à l'enregistreur électromagnétique. Un tracé direct de l'activité musculaire est ainsi obtenu. Pour permettre une appréciation quantitative des phénomènes enregistrés,

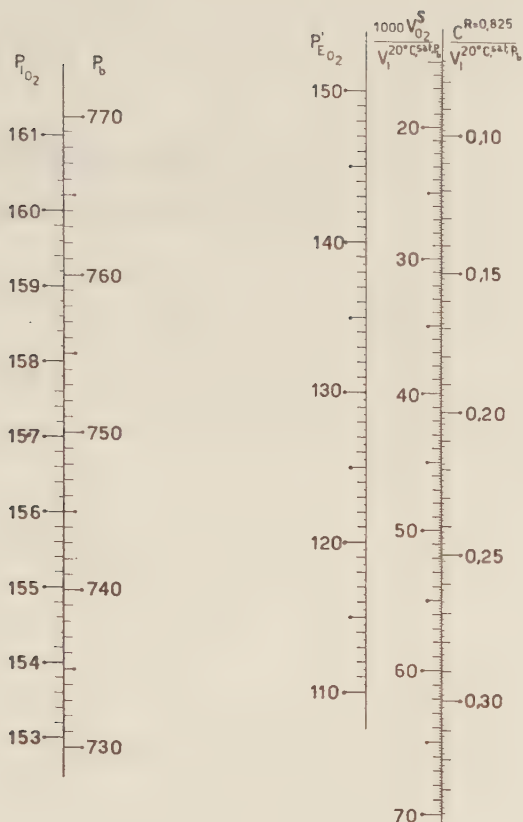


Fig. 2

NOMOGRAMME DE MARGARIA. (d'après MARGARIA et coll., 1954)

Connaissant d'une part la pression barométrique P_b ou la pression partielle de l'oxygène dans l'air ambiant $P_{I_{O_2}}$ (échelle A) et d'autre part la pression partielle de l'oxygène dans l'air expiré sec et privé de CO_2 $P'_{E_{O_2}}$ (échelle B), on fait passer une droite par les deux points situés sur les échelles A et B correspondants aux valeurs connues ; le point d'intersection de cette droite avec l'échelle C donne la valeur soit du volume d'oxygène consommé par litre d'air ventilé saturé et à $20^\circ \frac{V_{O_2}}{V_A} \cdot \frac{2}{V_A}$ soit l'équivalent en Kcal pour un quotient respiratoire moyen de 0,825, $\frac{C}{V}$.

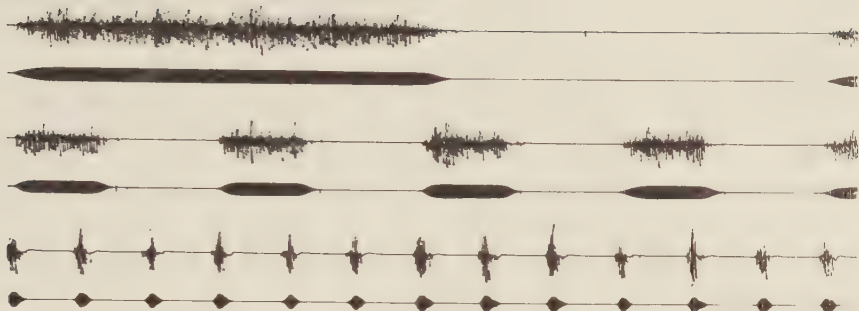


Fig. 3

ELECTROMYOGRAMME ET MECANOGRAMME AU COURS DU TRAVAIL
DES BICEPS BRACHIAUX

L'électromyogramme du biceps brachial est obtenu par deux électrodes métalliques de surface, appliquées sur la peau en regard du muscle. Les potentiels d'action musculaire ainsi recueillis sont amplifiés et enregistrés par un appareil électromagnétique à plumes.

Le mécanogramme obtenu par l'enregistrement d'une jauge de contrainte placée en série sur les câbles de traction permet d'apprécier les forces moyennes exercées et la durée exacte des périodes de travail.

A-électromyogramme et mécanogramme à une fréquence de contraction de 2,5/mn.

B-électromyogramme et mécanogramme à une fréquence de contraction de 10/mn.

C-électromyogramme et mécanogramme à une fréquence de contraction de 30/mn.

un intégrateur construit suivant le principe de BATES et COOPER (1954) a été utilisé, donnant un tracé E.M.G. intégré.

Le contrôle de la force exercée sur les câbles de traction a été réalisé par l'utilisation d'une jauge de contrainte placée en série sur ces câbles et connectés à l'enregistreur électromagnétique (v. fig. 3, 4 et 5). Comme pour l'activité électrique musculaire, un tracé direct et un tracé intégré ont été obtenus. L'obtention d'un mécanogramme est un élément capital permettant de déterminer les durées respectives des phases de contraction et de repos qui s'écartent en réalité des 50 % théoriquement recherchés. La consommation d'oxygène peut ainsi être rapportée à la durée exacte de la contraction et exprimée en ml/s; de plus les quantités de mouvement apparues au cours du travail statique peuvent être objectivées, permettant la comparaison de contraction de force et de durée différente.

II - PRINCIPE D'UTILISATION

Les mesures ont été pratiquées sur 8 adultes jeunes de sexe masculin. Elles ont eu lieu aux mêmes heures de la journée, en dehors des périodes de digestion. Les températures du laboratoire ont varié de 18° à 26°8 pour la température sèche et de 15° à 23°6 pour la température humide. La pression barométrique a varié de 740 à 778 mm de Hg.

Deux groupes musculaires différents ont été étudiés :

- le biceps brachial et ses muscles synergiques (brachial antérieur et long supinateur),
- le triceps sural.

Le travail statique a été réalisé, pour chacun de ces groupes par la contraction isométrique symétrique et simultanée des muscles

auxquels ils appartiennent.

En effet, la masse musculaire ainsi considérée est plus grande; la consommation d'oxygène étant plus importante, elle est plus facilement mesurable avec une erreur relative moindre. D'autre part, l'activité de posture est ainsi réduite par diminution des contraintes statiques résultant généralement d'un effort disymétrique.

A - Le biceps et ses muscles synergiques.

Le sujet est en position couchée, jambes allongées, les pieds prenant appui sur un plan vertical; les bras sont horizontaux le long du corps, les avant-bras fléchis à 90° (v. fig.4). Au niveau des coudes, deux appuis (2) permettant de maintenir la posture, en évitant la compression de la face postérieure des bras. Un câble de traction (3) est fixé au niveau de chacun des deux poignets par l'intermédiaire de bracelets (4); ces deux câbles se réunissent en Y (5) et relient la charge aux poignets. Les deux bracelets sont solidarisés par une barre rigide (6) qui neutralise la composante tendant à rapprocher les deux avant-bras l'un de l'autre dans un plan frontal.

Trois fréquences de contraction ont été étudiées :

- à 2,5/mn : un cycle complet dure 24 secondes, il comporte 12 secondes de travail et 12 secondes de repos.
- à 10/mn : un cycle complet dure 6 secondes; il comporte 3 secondes de travail et 3 secondes de repos.
- 30/mn : un rythme aussi rapide, choisi pour réduire l'activité musculaire aux seules phases de mise en tension et de relâchement (v.fig.3), ne permet pas d'utiliser le dispositif suivant la technique décrite ci-dessus.

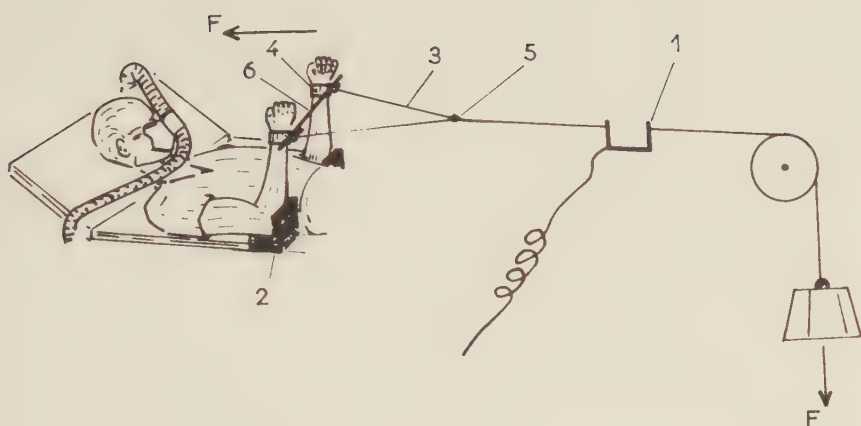


Fig. 4

SCHEMA DU DISPOSITIF UTILISE POUR LE TRAVAIL DES
MUSCLES FLECHISSEURS DES AVANT-BRAS

Le sujet est couché, les avant-bras sont fléchis à 90° et maintenus dans cette position par des appuis (2) au niveau des coudes. Il est relié à deux câbles de traction (3), qui se réunissent (5), par des bracelets au niveau des poignets (4). L'écartement des deux avant-bras est maintenu constant par une barre rigide (6). Une jauge de contrainte (1) est interposée sur le câble de traction. La force de traction du sujet équilibre la charge lorsque le plateau est en position basse. (fig. 1)

Un processus différent doit donc être suivi : le plateau reste fixé en position haute, le sujet soulève très légèrement la charge pour la libérer de son support et la repose immédiatement ; la cadence est donnée par un magnétophone.

Un déplacement de l'avant-bras est obligatoire, mais celui-ci reste peu important pour chaque contraction et n'est pas supérieur à celui noté avec les autres fréquences (v. tableau I).

Pour chacune des trois fréquences de contraction, trois charges ont été utilisées : 10, 15 et 20 kg pour les deux côtés. Le maintien de ces charges, compte-tenu des conditions expérimentales correspond à la mise en jeu de forces égales, respectivement, à 12, 9, 19, 3 et 25,7 % de la force maximum des fléchisseurs des bras mesurée par nous. Chaque expérience a été répétée trois fois pour chaque fréquence et chaque charge, à des jours différents.

B - Triceps sural.

Le sujet est en position assise, les cuisses horizontales, les jambes et les pieds fléchis à 90°, (fig.5). Les genoux sont maintenus par une barre transversale (2) empêchant tout déplacement vers le haut. Les pieds reposent sur un appui mobile (4) autour d'un axe (3) situé dans le même plan vertical que celui des jambes. Cet appui est relié à la charge par un système de câbles. La pression des pieds s'exerce par l'intermédiaire d'une cale située en regard de la tête des premiers métatarsiens.

Pour rapporter les forces exercées à leur point d'application c'est à dire au niveau de la tête des premiers métatarsiens (LINDHARD, 1912), il faut tenir compte du rapport des bras de levier en jeu. Le premier de celui-ci est déterminé par l'appareillage : distance de l'axe de rotation de l'appui mobile au point d'attache du câble de traction ; le second dépend

du sujet : distance de l'axe de flexion du pied à la tête du premier métatarsien; cette distance est de l'ordre de 14 cm (CASTEX - cité par VANDERVAEL, 1956).

Les forces mises en jeu ont été de 52,2 Kg, 65,1 kg, 75,5 kg et 89,9 kg. Le maintien de ces charges correspond à la mise en jeu de forces représentant respectivement 33,7, 41,7, 49,7 et 57,5 % de la force maximum mesurée par nous, des muscles considérés. Une seule fréquence de contraction (2,5/mn) a été utilisée dans cette partie de l'étude qui n'a porté que sur 2 sujets (v. tableau I).

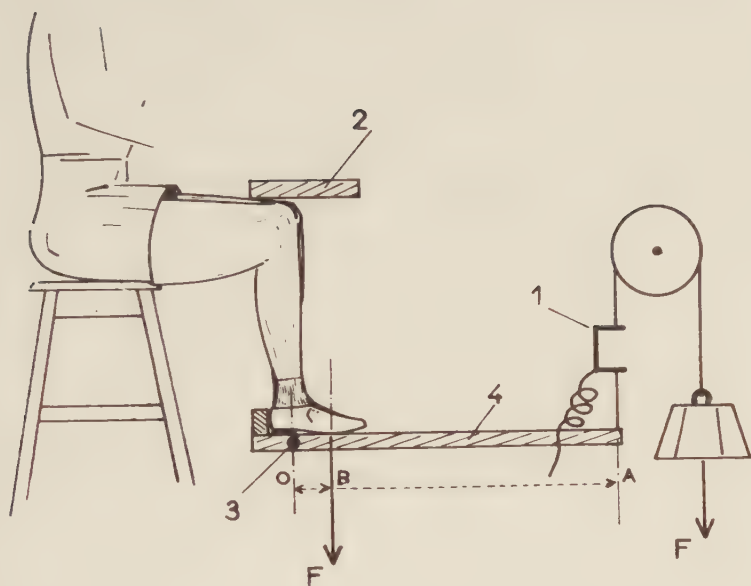


Fig. 5

SCHEMA DU DISPOSITIF UTILISE POUR LE TRAVAIL

DES TRICEPS SURAX

Le sujet est en position assise, les genoux maintenus par un appui (2). Les pieds, fléchis à 90° , reposent sur un plateau (4) mobile autour d'un axe (3) correspondant à l'axe de rotation du pied. L'autre extrémité du plateau est reliée à la charge par l'intermédiaire d'un câble sur lequel est interposé une jauge de contrainte (1). La force exercée par les pieds au niveau des premiers métatarsiens pour équilibrer la charge, est calculée par le rapport entre la distance de l'axe de rotation du plateau au point d'application de la force exercée par le sujet (O.B.) et la distance de cet axe de rotation au point d'attache du câble (O.A.).

TABEAU I

Groupe musculaire	Fréquence	Charge en Kg	Nombre de sujets	Nombre d'expériences	Déplacement par mvt en cm
Biceps brahcial	2,5/mn	10	5	15	0,25
		15	5	15	0,34
		20	5	15	1,02
	10/mn	10	5	15	0,24
		15	5	15	0,28
		20	5	15	1,02
	30/mn	10	2	6	0,48
		15	1	3	1,09
		20	1	3	0,53
Triceps sural	2,5/mn	52,7	2	6	0,29
		65,1	2	7	0,29
		77,5	1	3	0,08
		89,9	2	6	0,50

III - PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Après un repos de 15 à 20 minutes, en position de travail, période pendant laquelle aucune mesure n'est effectuée, le sujet respire pendant 2 ou 3 minutes de l'air extérieur par l'intermédiaire du masque et des tubulures du circuit pour permettre son adaptation aux conditions expérimentales.

Les mesures de consommation d'oxygène sont faites ensuite par période de 5 minutes; chaque expérience comprend sans discontinuité : trois périodes de repos, deux périodes de travail et enfin deux périodes de repos. Rappelons que l'analyse de chaque échantillon de gaz expiré se fait pendant le déroulement de l'expérience avec un décalage, par rapport au temps de collection de celui-ci, de 5 minutes. La fréquence cardiaque est enregistrée pendant la période de repos précédant immédiatement le travail, pendant les deux périodes de travail et pendant la période de repos qui le suit.

L'électromyogramme et la force exercée sur les câbles de traction sont enregistrés pendant les deux périodes de travail.

R E S U L T A T S

Les résultats que nous présentons dans ce chapitre concernant les variations de la consommation d'oxygène et de la fréquence cardiaque au cours de contractions statiques intermittentes.

Dans une première partie, nous envisageons la consommation d'oxygène au cours de la contraction des biceps brachiaux et des muscles synergiques. Le coût global d'une contraction et le coût de ses différentes phases sont abordés en fonction de la force et de la durée de celle-ci.

La deuxième partie porte sur la consommation d'oxygène au cours de la contraction des triceps suraux que nous comparons à celle des biceps.

Dans une troisième partie, nous présentons les modifications de la fréquence cardiaque au cours de ce type d'activité musculaire; mais seuls les résultats portant sur la période de travail sont considérés ici. Aussi, nous n'étudions que les niveaux du plateau de la courbe de fréquence cardiaque et non les modalités d'installation ou de récupération de celui-ci.

I - CONSOMMATION D'OXYGENE AU COURS DU TRAVAIL STATIQUE INTERMITTENT.

Définition de quelques termes utilisés.

Nous rappelons, avant de présenter nos résultats, la définition de quelques termes que nous utilisons.

a - La consommation spécifique de travail
(ΔV_{O_2}) représente l'excédent de consommation

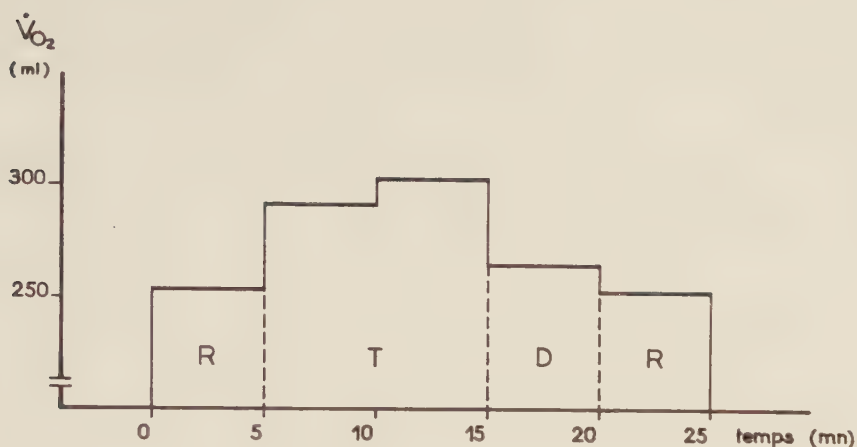


Fig. 6

DIAGRAMME DE LA CONSOMMATION D'OXYGENE

AU COURS D'UNE EXPERIENCE

R. représente la consommation de repos pendant 5mn.

D. représente la consommation de repos pendant 5mn. immédiatement après travail, comprenant donc la dette.

T. représente la consommation pendant les 10mn. de travail. On remarque que la différence entre la 2ème et la 1ère période de travail correspond à la dette, c'est-à-dire D-R.

d'oxygène pendant le travail par rapport à la consommation de repos. Nous avons utilisé comme valeur de consommation de repos (R), celle obtenue pendant la période de 5 mn précédant immédiatement le travail et exprimée en ml.

b - La consommation de travail (T), est déterminée par le total des consommations mesurées pendant les deux périodes consécutives de 5 mn de travail et exprimée en ml.

c - Bien que le travail considéré soit faible et n'intéresse qu'une masse de muscles peu importante, on pouvait prévoir l'existence d'une dette d'oxygène; cette prévision s'est révélée exacte comme on le verra ci-dessous. On doit donc tenir compte pour le calcul du coût du travail statique d'un excès de consommation apparaissant immédiatement après le travail et représenté par la différence entre la consommation pendant la période de 5 mn de repos après travail (D) et la consommation de repos avant travail (R). (v. fig.6) Etant donné que la consommation de travail est déterminée pendant les 10 minutes que dure celui-ci, et que la dette d'oxygène n'apparaît que dans la période de 5 minutes consécutive au travail (temps suffisant au paiement de celle-ci), la consommation spécifique de travail se calcule donc par la formule :

$$\left(\frac{T}{10} - \frac{R}{5} \right) + \frac{D - R}{5}$$

Les résultats sont ainsi exprimés en ml/mn.

d - Comme nous l'avons montré au chapitre précédent, le dépouillement des mécanogrammes montre que la durée de travail ne représente pas strictement 50 % de la durée du cycle travail - repos. Aussi, en rapportant la consommation spécifique de travail à la durée exacte de la phase active de la contraction, on obtient le coût réel de la seule phase de contraction, que nous avons exprimé en millilitres d'oxygène par seconde de contraction (ml/s).

A - TRAVAIL STATIQUE EFFECTUE PAR LE BICEPS BRACHIAL

Les contractions statiques intermittentes mettant en jeu des forces de 10, 15 et 20 kg ont été réalisées pour trois fréquences différentes. Rappelons que la durée totale de contraction correspond à environ 50 % de la durée de la période de travail.

1 - Contractions intermittentes à fréquence faible (2,5/mn).

La consommation d'oxygène augmente avec la force ainsi qu'il apparaît à l'examen de la figure 7. Autant qu'on puisse en juger, malgré le nombre restreint des points expérimentaux obtenus, l'augmentation de la dépense énergétique avec la charge peut être considérée comme linéaire pour des forces inférieures ou égales à 15 kg;

40,9 ml/mn à 10 kg,

62,6 ml/mn à 15 kg.

En effet, ces deux points s'alignent sur une droite passant par l'origine des coordonnées.

Au-delà de ce seuil, la courbe cesse d'être linéaire. La consommation d'oxygène augmente alors plus vite que la charge :

119,2 ml/mn à 20 kg.

Ce fait peut traduire la survenue de co-contractions ainsi que nous le verrons dans la discussion.

A la fréquence de 2,5/mn, la durée de chaque contraction dépasse de très peu les 12 secondes théoriquement prévues, puisque par rapport à la durée du cycle complet qui est de 24 s, les durées moyennes de la phase de contraction ont été de :

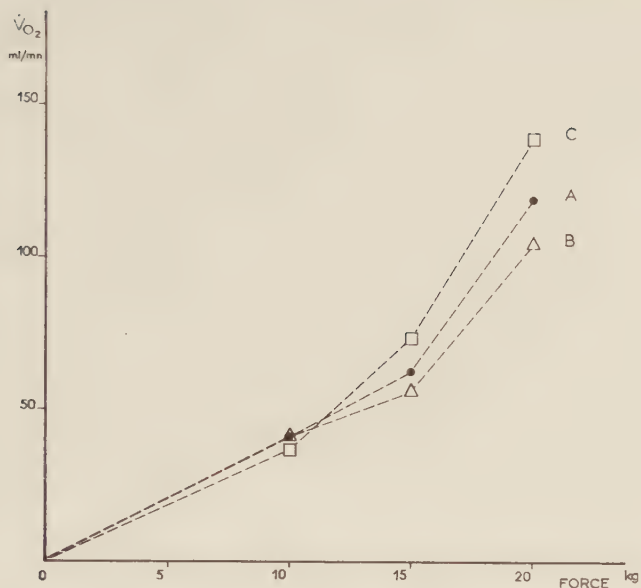


Fig. 7

BICEPS BRACHIAUX; CONSOMMATION SPECIFIQUE DE TRAVAIL

A - Fréquence de contraction de 2,5/mn

B - Fréquence de contraction de 10/mn

C - Fréquence de contraction de 30/mn

On remarque que les courbes A et B comportent une portion linéaire jusqu'au seuil de 15 kg ; et qu'au delà la consommation d'oxygène croît plus vite que la force.

53,2 % à 10 kg

53,3 % à 15 kg

52,1 % à 20 kg

Si l'on rapporte à la consommation d'oxygène mesurée en ml/mn à la durée exacte des contractions, on obtient une nouvelle courbe de consommation d'oxygène, exprimée en ml/s, en fonction de la force mise en jeu (fig.8). On remarque que cette courbe garde la même allure que la précédente.

2 - Contractions intermittentes à fréquence moyenne : 10/mn.

Des résultats en tous points superposables aux précédents ont été obtenus lorsque la fréquence de contraction était un peu plus élevée (fig.7). L'augmentation de la consommation d'oxygène est proportionnée à la force développée jusqu'à 15 kg.:

41,2 ml/mn pour 10 kg

55,7 ml/mn pour 15 kg

Au-delà de ce seuil la consommation croît plus vite que la force. Cette élévation est relativement importante :

106,0 ml/mn pour 20 kg

La durée des contractions a dépassé les 3 secondes théoriquement prévues; elle a été respectivement, par rapport à la durée du cycle complet (6 s) de :

59,7 % à 10 kg

57,0 % à 15 kg

57,6 % à 20 kg

Ces durées sont en moyenne légèrement supérieures à celles des contractions réalisées à fréquence faible.

Comme dans le cas du travail statique à la fréquence de $2,5/\text{mn}$, on peut admettre la linéarité de l'accroissement de consommation d'oxygène avec la force développée jusqu'à une force de 15 kg. Cette linéarité, masquée sur la figure 7, du fait des durées inégales de contraction, apparaît nettement sur la figure 8 où les consommations d'oxygène sont exprimées en ml/s .

Les deux courbes A ($2,5/\text{mn}$) et B ($10/\text{mn}$) de la figure 7 sont à peu près superposables. Mais, après correction en fonction des durées réelles de contraction (Fig.8), elles se détachent nettement l'une de l'autre.

L'existence d'une consommation d'oxygène moindre à la fréquence de $10/\text{mn}$ sera discutée ultérieurement.

3 - Contractions intermittentes à fréquence élevée ($30/\text{mn}$).

A la fréquence de 30 contractions par minute, la consommation spécifique de travail croît en fonction de la force de façon pratiquement linéaire (voir fig. 7) entre 10 et 20 kg. Nous avons trouvé en effet :

37,5 ml/mn à 10 kg

91,3 ml/mn à 15 kg

134,6 ml/mn à 20 kg

Mais les durées de contraction sont dans ce cas nettement inférieures à 50 % de la durée totale du cycle travail - repos, pour les raisons que nous avons exprimées dans le chapitre précédent. Le dépouillement des mécanogrammes a donné les résultats suivants :

36,5 % à 10 kg

45,6 % à 15 kg

43,3 % à 20 kg

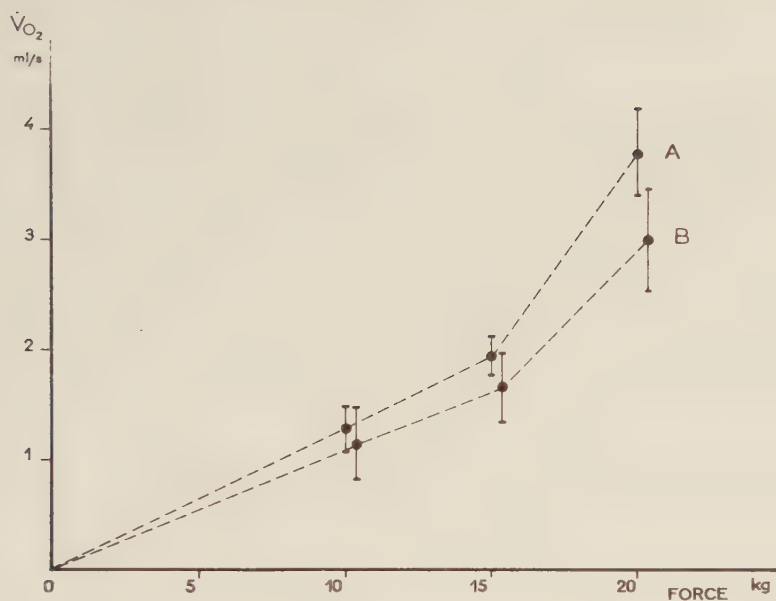


Fig. 8

BICEPS BRACHIAUX; CONSOMMATION SPECIFIQUE DE TRAVAIL

APRES CORRECTION EN FONCTION

DE LA DUREE REELLE DES CONTRACTIONS

A - fréquence de contraction de 2,5/mn

B - fréquence de contraction de 10/mn

Ces deux courbes, exprimées en ml/s en fonction de la force de contraction, ont la même allure que les deux courbes correspondantes de la fig. 7. On peut noter que la courbe B se situe au-dessous de la courbe A et que la différence s'accroît lorsque la force croît.

La courbe corrigée en fonction de ces durées réelles de contraction confirme le rapport directement proportionnel entre la consommation d'oxygène et l'augmentation de la force entre 10 et 20 kg. C'est ce qui apparaît à l'examen de la figure 9, où l'on remarque que le changement de pente de la courbe de consommation d'oxygène en fonction de la force utilisée est vraisemblablement plus précoce que pour les fréquences de contraction faible et moyenne.

4 - Consommation d'oxygène et fréquence de contraction.

Nous venons de constater que les consommations spécifiques de travail aux fréquences de 2,5/mn et 10/mn coïncidaient de façon remarquable pour des forces égales (fig.7), mais qu'en réalité, si l'on tient compte des durées inégales de contraction, les deux courbes correspondantes se détachaient l'une de l'autre. L'étude statistique des résultats montre cependant que les différences ne sont pas significatives pour 10 et 15 kg, mais qu'elles le sont pour 20 kg en admettant un seuil de probabilité inférieur à 5 %.

Les résultats aux fréquences faible et moyenne d'une part (fig.8) et élevée d'autre part (fig.9) ne sont pas directement comparables, même lorsqu'ils sont exprimés en ml/s, c'est à dire après correction en fonction de la durée réelle de contraction.

En effet, les conditions expérimentales ne sont pas strictement identiques et les indications portées en abscisse sur ces deux figures n'ont pas la même signification, bien que les unités utilisées soient les mêmes :

- Dans le cas des fréquences de 2,5/mn et 10/mn, les forces notées en kg correspondent effectivement à celles développées au cours de la contraction et maintenues constantes pendant un temps mesurable voisin respectivement de 3 et 12 secondes.

- Au contraire, au cours des contractions à fréquence élevée, les forces indiquées en abscisse sont des forces maximales instantanées. Les forces moyennes développées au cours de la contraction seraient donc nettement inférieures à celles-ci - (voir fig. 3). Une comparaison réelle ne peut donc être faite qu'en considérant la consommation d'oxygène par quantité de mouvement.

Celle-ci a été appréciée en tenant compte de la durée des contractions et des forces moyennes exercées durant la même période par le calcul de la surface des mécanogrammes.

Fréquence de contraction.	V _{O2} ml / s	Force moyenne kg	V _{O2} ml/kg/s
2,5/mn	1,28	10	0,128
	1,96	15	0,131
	3,82	20	0,191
10/mn	1,15	10	0,115
	1,66	15	0,111
	3,03	20	0,152
30/mn	1,7	6,8	0,249
	3,4	10,8	0,314
	5,2	14,0	0,371

TABLEAU II

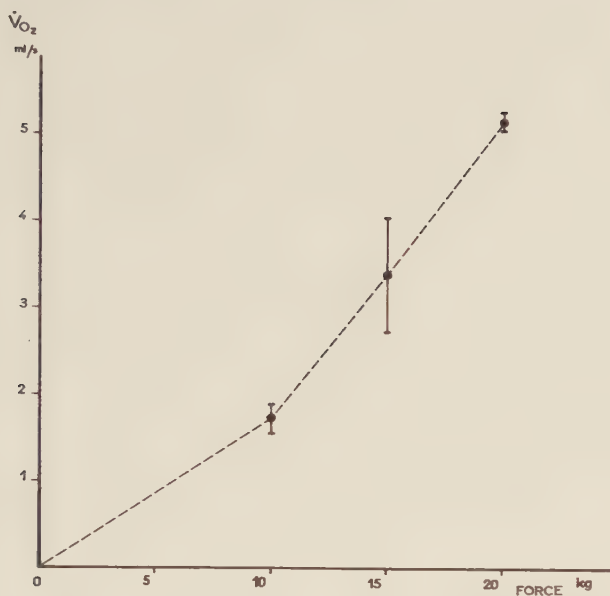


fig. 9

BICEPS BRACHIAUX : CONSOMMATION SPECIFIQUE DE TRAVAIL

APRES CORRECTION EN FONCTION DE LA DUREE REELLE DES CONTRACTIONS

Fréquence de contraction de 30/mn. On peut noter que le changement de pente est plus précoce que pour les deux autres fréquences de contraction (v. fig. 8).

Le coût des contractions aux fréquences faible, moyenne et rapide peut être ainsi directement comparé (v. Tableau II). Il est exprimé en ml d'O₂ par kilogramme maintenu pendant une seconde.

Un tel calcul entraîne un accroissement des différences du coût énergétique entre les contractions à fréquence faible et moyenne d'une part et de celle à fréquence rapide, d'autre part, comme le montre la figure 10. On peut constater ainsi une augmentation relative du coût énergétique des contractions statiques intermittentes dès qu'interviennent, soit une force élevée, soit une fréquence de contraction rapide.

5 - Coût énergétique du maintien statique.

Une contraction statique intermittente, même effectuée sans déplacement, comporte trois phases distinctes comme le montre l'examen d'un mécanogramme (fig. 11). On peut distinguer une phase de mise en tension, une phase de maintien et une phase de relâchement. La phase de maintien est strictement isométrique et isotonique, les deux autres phases ne sont qu'isométriques, la tension étant par définition variable.

La technique expérimentale que nous avons utilisée nous permet de différencier la consommation d'oxygène qui revient à la phase de maintien et celle qui est due aux deux phases de tension variable. En effet, une contraction à fréquence élevée ne comporte pas de phase de maintien (v. fig. 11). Seules, les deux phases de mise en tension et de relâchement sont conservées.

Le coût d'une contraction à la fréquence de 30/mn, c'est à dire le coût d'1 mise en tension et d'un relâchement a été calculé et s'établit à :

1,3 ml à 10 kg

3,0 ml à 15 kg

4,5 ml à 20 kg

En déduisant pour des forces équivalentes, ces valeurs du coût d'une contraction à la fréquence de 2,5/mn ou de 10/mn, on obtient le coût de la seule phase de maintien à ces fréquences.

Coût énergétique de la phase de maintien
(isométrique et isotonique)

Fréquence	Force	Coût d'une contraction	Coût par minute
2,5/mn	10 kg	15,1 ml	42,8 ml/mn
	15 kg	22,5 ml	56,3 ml/mn
	20 kg	43,0 ml	107,5 ml/mn
10/mn	10 kg	2,9 ml	29 ml/mn
	15 kg	3,2 ml	32 ml/mn
	20 kg	6,0 ml	60 ml/mn

TABEAU III

L'allure des courbes établies à partir de ces valeurs et reproduites figure 12 sont comparables à celles de la figure 8, où la consommation d'oxygène est exprimée en ml/mn. On retrouve le même changement de pente au niveau de 15 kg, déjà signalé précédemment.

Le coût de la seconde de maintien pur a été également calculé; il apparaît plus élevé pour des fréquences de contraction faible, ainsi que le font apparaître les chiffres ci-dessous :

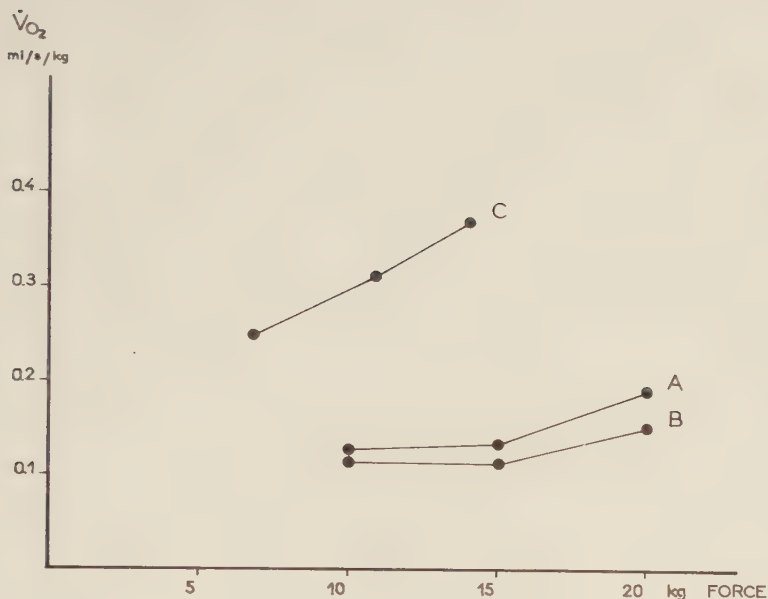


Fig. 10

BICEPS BRACHIAUX CONSOMMATION SPECIFIQUE DE TRAVAIL

APRES CORRECTION DE LA DUREE DE CONTRACTION

ET RAPPORTEE AU KG MAINTENU

A - Fréquence de contraction de 2,5/mn

B - Fréquence de contraction de 10/mn

C - Fréquence de contraction de 30/mn

$\dot{V}O_2/S/Kg$ est exprimé en fonction de la force moyenne exercée ce qui explique le décalage de la courbe C vers des forces plus faibles. Cette figure fait apparaître une nette différence de "rendement" entre les fréquences de contraction de 2,5 et 10/mn d'une part et la fréquence de contraction de 30/mn. d'autre part

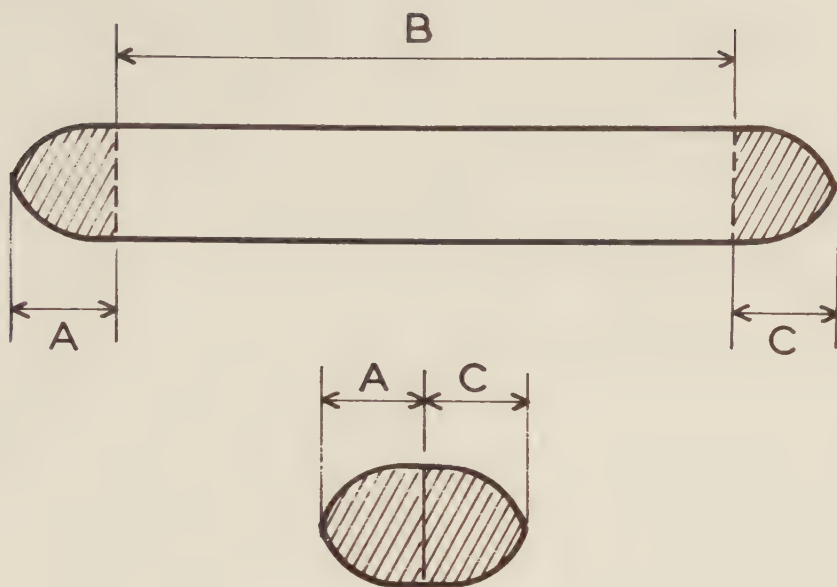


Fig. 11

SCHEMA DE DEUX MECANOGRAMMES

En haut : mécanogramme d'une contraction comportant une phase de mise en tension, une phase de maintien et une phase de relâchement. (Fréquences : de contraction de 2,5 et de 10/mn).

En bas : mécanogramme d'une contraction ne comportant qu'une phase de mise en tension et une phase de relâchement, sans phase de maintien (fréquence de contraction de 30/mn).

A - phase de mise en tension : isométrique.

B - phase de maintien : isométrique et isotonique.

C - phase de relâchement : isométrique.

Coût de la seconde de maintien

Force	Fréquence de contraction	
	2,5 mn	10 mn
10 kg	1,2 ml/s	0,8 ml/s
15 kg	1,7 ml/s	0,8 ml/s
20 kg	3,5 ml/s	1,8 ml/s

TABLEAU IV

En tenant compte du fait que les contractions réalisées à la fréquence de 30/mn ont une durée de l'ordre de 0,8 à 0,9 secondes, il apparaît clairement, d'après les valeurs données ci-dessus, que pour une activité musculaire de durée égale, le maintien est toujours moins coûteux au point de vue énergétique que la mise en tension et le relâchement réunis.

6 - Importance relative de la dette d'oxygène.

La dette d'oxygène contractée par le muscle au cours d'un travail local est relativement faible. Elle se calcule facilement à partir des volumes d'oxygène consommé pendant les périodes de repos qui précèdent et qui suivent la période de travail.

Bien que le procédé utilisé soit quelque peu arbitraire, nous donnons, ci-dessous, dans les tableaux V et VI, les valeurs moyennes de la dette en ml pour chaque force mise en jeu et pour chaque fréquence de contraction, calculée par la formule $D - R$, et son pourcentage par rapport à

la consommation spécifique des 10 mn de travail
(voir définitions).

Valeur moyenne de la dette en ml.

Force	Fréquence de contraction		
	2,5/mn	10/mn	30/mn
10 kg	18,1 ml	27,6 ml	44,7 ml
15 kg	25,0 ml	20,1 ml	36,5 ml
20 kg	69,4 ml	56,4 ml	68,7 ml

TABLEAU V

Pourcentage de la dette par rapport à la
consommation spécifique de travail

Force	Fréquence de contraction		
	2,5/mn	10/mn	30/mn
10 kg	4,4	6,7	6,7
15 kg	4,0	3,4	4,2
20 kg	6,0	5,3	5,3

TABLEAU VI

B - TRAVAIL STATIQUE EFFECTUE PAR LE TRICEPS SURAL

1 - Coût du travail des muscles du mollet.

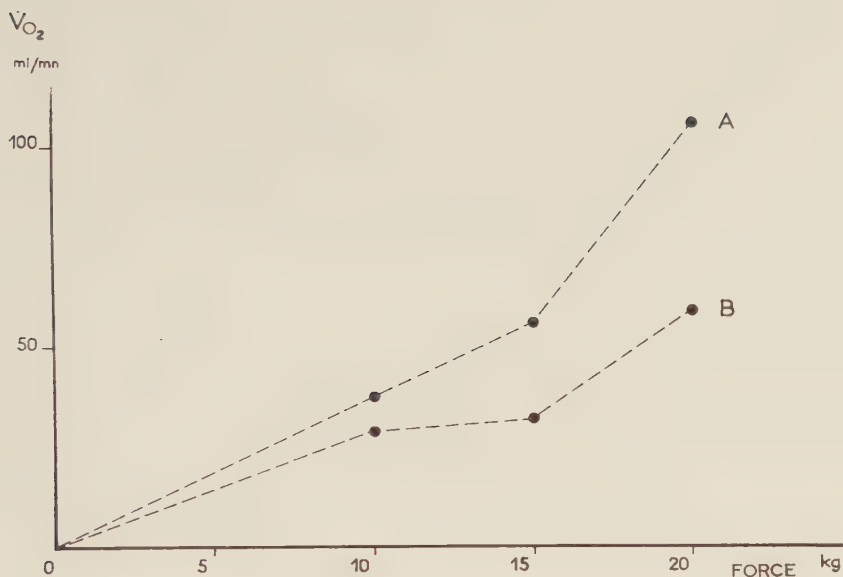


Fig. 12

BICEPS BRACHIAUX: COUT DES SEULES PHASES DE MAINTIEN

Le coût des contractions à la fréquence de 30/mn représente le coût des seules phases de mise en tension et de relachement des contractions ; par différence avec le coût aux deux autres fréquences de contraction, on obtient le coût des seules phases de maintien.

A - fréquence de contraction de 2,5/mn.

B - fréquence de contraction de 10/mn.

On peut noter que les phases de maintien à la fréquence de 10/mn sont moins couteuses que celles à la fréquence de 2,5/mn pour une même durée de contraction.

La dépense d'oxygène a été mesurée, dans notre expérimentation, au cours d'un travail statique intermittent des muscles du mollet; mais si les forces mises en jeu ont pu être variées, une seule fréquence de contraction a été étudiée : 2,5/mn.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que la consommation spécifique de travail croît de façon linéaire avec la force de contraction, tout au moins entre 52,7 kg et 89,9 kg, valeurs extrêmes qui ont été retenues. Le coût moyen a été en effet respectivement de :

31,0 ml/mn à 52,7 kg

61,3 ml/mn à 65,1 kg

86,9 ml/mn à 77,5 kg

124,3 ml/mn à 89,9 kg

L'examen de la figure 13 montre que si la droite obtenue en reportant les valeurs ci-dessus était prolongée vers le bas, elle ne passerait pas par l'origine, mais couperait l'axe des abscisses nettement à droite de celle-ci.

Ce fait permet de supposer que le rapport entre la consommation d'oxygène et la force mise en jeu, que nous avons trouvé pour des forces comprises entre 52,7 kg et 89,9 kg se modifie à un niveau inférieur à 52,7 kg. Mais une étude expérimentale serait nécessaire pour préciser le niveau et les variations de ce rapport.

Comme pour le travail réalisé par les biceps brachiaux, la durée de la phase de contraction des triceps suraux a dépassé les 50 % prévus du cycle de 24 s., soit 12 s. Les durées exactes ont été en moyenne, par rapport au cycle travail - repos, de : 54,3 % à 52,7 kg

55,2 % à 65,1 kg

53,2 % à 77,5 kg

58,1 % à 89,9 kg

Le coût énergétique par seconde de contraction calculé en fonction de ces durées réelles de contraction est de :

0,95 ml/s à 52,7 kg

1,85 ml/s à 65,1 kg

2,70 ml/s à 77,5 kg

3,60 ml/s à 89,9 kg

La courbe correspondant à ces valeurs, si elle était tracée, différerait très peu de celle de la figure 13, aux unités près.

2 - Comparaison avec le biceps.

Afin de comparer le coût énergétique du travail effectué par les triceps suraux et par les biceps brachiaux, nous avons calculé, comme pour ceux-ci, la dépense d'oxygène correspondant au maintien de 1 kg pendant 1 s, c'est à dire, la dépense énergétique correspondant à l'unité de quantité de mouvement.

Nous avons obtenu les chiffres suivants :

0,018 ml/s/kg à 52,7 kg

0,028 ml/s/kg à 65,1 kg

0,035 ml/s/kg à 77,5 kg

0,040 ml/s/kg à 89,9 kg

La courbe correspondante a été reportée sur la figure 14; la comparaison avec les résultats obtenus sur le biceps brachial (voir figure 10),

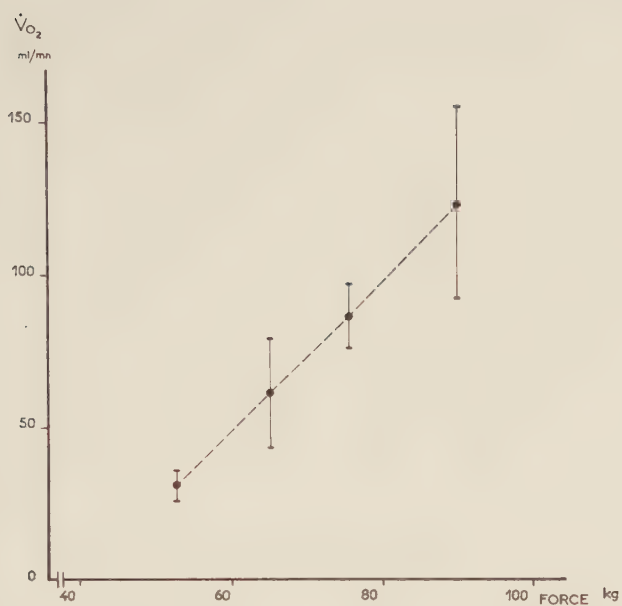


Fig. 13

TRICEPS SURAU : CONSOMMATION SPECIFIQUE DE TRAVAIL

A la fréquence de contraction de 2,5/mn, la consommation d'oxygène varie de façon linéaire avec la force de contraction entre 50 et 90 Kg. Cette droite ne passe pas par l'origine ce qui laisse supposer un changement de pente au dessous de 50 Kg.

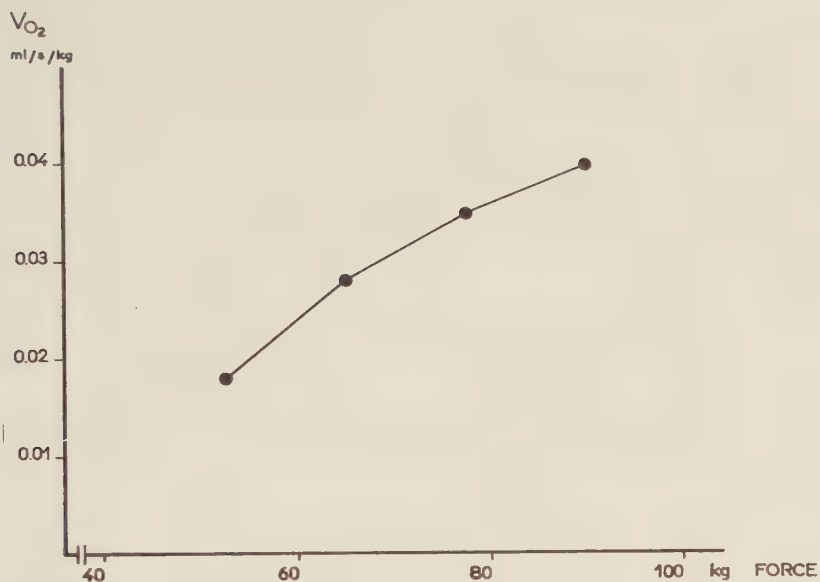


Fig. 14

TRICEPS SURAX

Consommation spécifique de travail après correction en fonction de la durée réelle de contraction (fréquence de contraction de 2,5/mn).

La comparaison avec la courbe correspondante des biceps brachiaux (fig. 10 courbe A), montre un rendement nettement plus élevé dans le cas des triceps.

met en évidence une dépense relativement moindre pour les triceps suraux que pour les biceps brachiaux. Mais le rapport des bras de levier n'est pas identique pour les deux groupes musculaires. Et ce fait sera discuté et précisé au chapitre suivant. Or, malgré cette restriction, on peut déjà confirmer ce phénomène.

3 - Importance relative de la dette.

Nous avons estimé l'importance relative de la dette par la même technique de calcul que pour le biceps brachial. Cette dette, déterminée par la formule $D - R$, a été rapportée à la consommation spécifique des 10 mn de travail.

Les valeurs absolues et relatives de la dette contractée lors du travail des muscles du mollet sont les suivantes:

Force kg	Dette d'oxygène	
	(ml)	(p.100)
52,7	9,1	3,0
65,1	6,5	1,1
77,5	14,0	1,6
89,9	39,7	3,2

TABLEAU VII

La dette est relativement modérée et dans l'ensemble, moindre que celle constatée pour le travail des biceps brachiaux. Ce fait traduit peut être une modalité différente de vascularisation et de fonctionnement des deux groupes musculaires.

II - LA FREQUENCE CARDIAQUE AU COURS DU TRAVAIL STATIQUE.

Nous présentons dans ce paragraphe, les modifications de la fréquence cardiaque accompagnant le travail statique intermittent. Seules, les mesures effectuées au cours du travail des biceps brachiaux sont envisagées ici. Mais avant de décrire les résultats obtenus, il nous faut préciser la méthode de dépouillement que nous avons utilisée.

L'activité musculaire étudiée reste modérée; aussi, entraîne-t-elle rapidement l'établissement d'un état constant, comme l'ont montré quelques dépouillements effectués par sondage. Nous n'abordons pas ici les modalités d'installation du plateau qui le caractérise, ni les modalités de la phase de récupération. Nous ne considérons que le niveau atteint par la fréquence cardiaque au cours du travail et nous n'avons tenu compte que des chiffres obtenus au cours de la deuxième période de travail.

Comme pour la consommation d'oxygène, nous avons calculé l'augmentation de la fréquence cardiaque au cours du travail par rapport à son niveau de repos. Nous avons donc déduit des valeurs de fréquence cardiaque moyenne obtenues au cours des 5 dernières minutes de travail, les valeurs de la fréquence cardiaque au cours de 5 mn de repos précédant immédiatement le travail (R_3). Ces résultats qui font apparaître l'augmentation de la fréquence cardiaque due au travail sont exprimés en nombre de pulsations par minute.

Les résultats présentés maintenant concernant deux aspects des variations de la fréquence cardiaque au cours du travail statique. D'une part, nous envisageons la fréquence cardiaque en fonction de la durée et de la force des contractions. D'autre part, nous comparons ces résultats à ceux obtenus par la mesure de la consommation d'oxygène.

A - Variations de la fréquence cardiaque en fonction de la force de contraction.

1 - Fréquence faible : 2,5/mn

Les chiffres obtenus montrent que l'augmentation de la fréquence cardiaque est directement proportionnelle à la force mise en jeu entre 10 et 20 kg (voir tableau VIII).

L'examen de la courbe correspondante (voir figure 15) permet en outre deux remarques :

a - Le changement de pente observé pour une force de 15 kg sur la courbe de consommation d'oxygène à même fréquence n'est pas retrouvé ici;

b - si nous prolongeons la droite obtenue vers le bas, celle-ci ne passe pas par l'origine, mais coupe l'axe des abscisses à droite de son origine. Ce fait permet de supposer que le changement de pente observé pour la consommation d'oxygène pour une force de 15 kg, se situe probablement au-dessous de 10 kg pour la fréquence cardiaque. Mais ce point sera discuté au chapitre suivant.

Les épreuves de signification entre moyennes montrent que les trois valeurs obtenues diffèrent statistiquement entre elles, bien que les différences soient faibles en valeur absolue; les seuils de probabilité sont respectivement de $P = .01$ entre les valeurs obtenues pour 10 et 15 kg et de $P = .05$ pour celles correspondant à 15 et 20 kg.

2 - Fréquence moyenne : 10/mn

Nous retrouvons pour une fréquence de contractions de 10/mn des résultats semblables à ceux mentionnés ci-dessus (voir tableau VIII).

L'examen de la figure 15 fait apparaître

que l'augmentation de fréquence cardiaque est proportionnelle à la force mise en jeu. On remarque, à l'inverse du cas précédent, qu'il existe un léger changement de pente à une force de 15 kg, mais beaucoup moins marqué que pour la consommation d'oxygène à la fréquence correspondante.

Cependant, la courbe tracée par les trois points expérimentaux, prolongée vers le bas, coupe l'axe des abscisses à droite de son origine, ce qui laisse aussi supposer un nouveau changement de pente pour des forces inférieures à 10 kg.

Fréquence de contraction	Force mise en jeu	Augmentation de la fréquence cardiaque en pulsations/mn
2,5/mn	10 kg	4,5
	15 kg	8,8
	20 kg	13,1
10/mn	10 kg	2,2
	15 kg	6,2
	20 kg	11,5
30/mn	10 kg	6,3
	15 kg	10,7
	20 kg	16,8

TABLEAU VIII

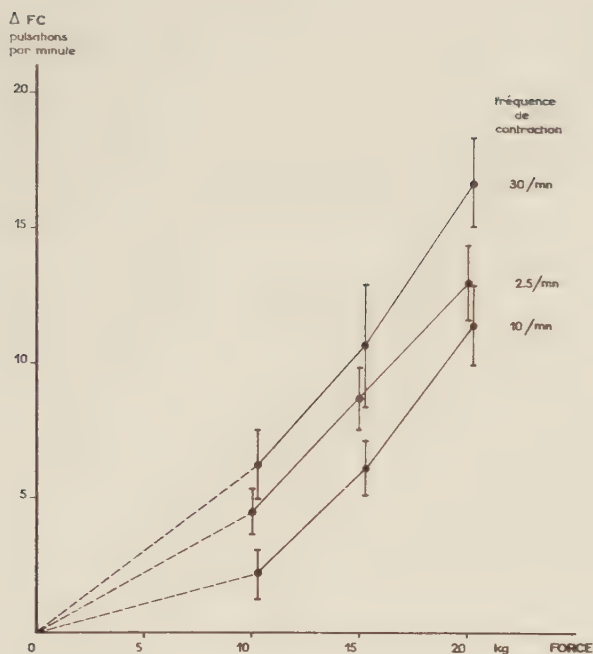


Fig. 15

EICEPS BRACHIAUX: AUGMENTATION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE
 EN FONCTION DE LA FORCE DE CONTRACTION

La courbe de la fréquence de contraction de 10/mn se situe au dessous de celle de la fréquence de contraction de 2,5/mn, et celle de la fréquence de contraction de 30/mn est plus élevée, comme pour la consommation d'oxygène (v. fig. 7).

Comme dans le cas des contractions à fréquence faible, les trois valeurs moyennes sont significativement différentes les unes des autres ($P < .01$).

3 - Fréquence élevée : 30/mn

La courbe obtenue à cette fréquence a la même allure générale que les deux courbes précédemment décrites (voir figure 15). Cette courbe doit être rapprochée de celle qui lui correspond pour la consommation d'oxygène (voir figure 7) : toutes deux comportent un faible changement de pente pour une force de 15 kg, et prolongées vers le bas elles coupent l'axe des abscisses à droite de l'origine, ce qui permet de supposer, comme précédemment, un changement de pente pour des forces inférieures à 10 kg.

Les épreuves de signification de moyenne entre les trois valeurs obtenues pour cette fréquence de contraction font ressortir que les différences ne sont pas significatives entre deux points consécutifs, en raison principalement du nombre plus faible d'expériences réalisées à cette fréquence.; Ce fait n'enlève probablement rien à l'allure générale de la courbe, les différences restant très significatives entre les augmentations de fréquence cardiaque à 10 kg et 20 kg ($P < .01$).

B - Fréquence de contraction et fréquence cardiaque.

Pour les trois fréquences de contractions étudiées, l'augmentation de la fréquence cardiaque est proportionnelle à la force mise en jeu entre 10 et 20 kg, mais il est probable, comme nous l'avons vu, que le rapport entre l'augmentation de la fréquence cardiaque et la force diminue pour des forces inférieures à 10 kg. Une étude expérimentale serait évidemment nécessaire pour confirmer ce point. La comparaison des ré-

sultats obtenus à ces trois fréquences pour les mêmes charges, montre par l'examen des courbes correspondantes (voir figure 16) que l'augmentation de la fréquence cardiaque n'est pas liée directement à un accroissement de la fréquence de contractions et la courbe de la fréquence de 30/mn se situe au-dessus de celle de la fréquence de 10/mn. Il faut rappeler en effet que la durée réelle des contractions est presque identique pour les fréquences de 10/mn et de 2,5/mn. Elle est cependant nettement différente entre celles-ci et la fréquence de 30/mn. Nous avons signalé que la consommation d'oxygène était moindre à la fréquence de contractions de 10/mn qu'à celle de 2,5/mn pour des forces correspondantes. Nous retrouvons ici le même phénomène et il est important de souligner l'identité des conclusions auxquelles nous conduisent, sur ce point, deux méthodes d'investigation différentes.

Cependant, il faut noter que les différences ne sont pas significatives entre les valeurs obtenues aux fréquences de contractions de 2,5/mn et de 10/mn d'une part, et de 2,5/mn et de 30/mn d'autre part, pour les mêmes forces, mais qu'elles sont significatives entre les valeurs obtenues aux fréquences de contraction de 10/mn et de 30/mn, c'est à dire entre les valeurs des deux courbes extrêmes.

Il faut aussi rappeler que pour la consommation d'oxygène, nous avons tenu compte de la durée réelle de contraction pour les différentes fréquences étudiées. Le calcul avait permis de rapporter la dépense spécifique de travail à la seconde de contraction. Une telle opération mathématique peut être théoriquement adoptée pour les variations de la fréquence cardiaque : elle tendrait alors, comme pour la consommation d'oxygène, à augmenter la différence entre les valeurs obtenues à la fréquence de 30/mn et celles obtenues aux deux autres fréquences. Mais nous n'avons pas repris cette méthode, la raison en est la grande similitude entre les modifications

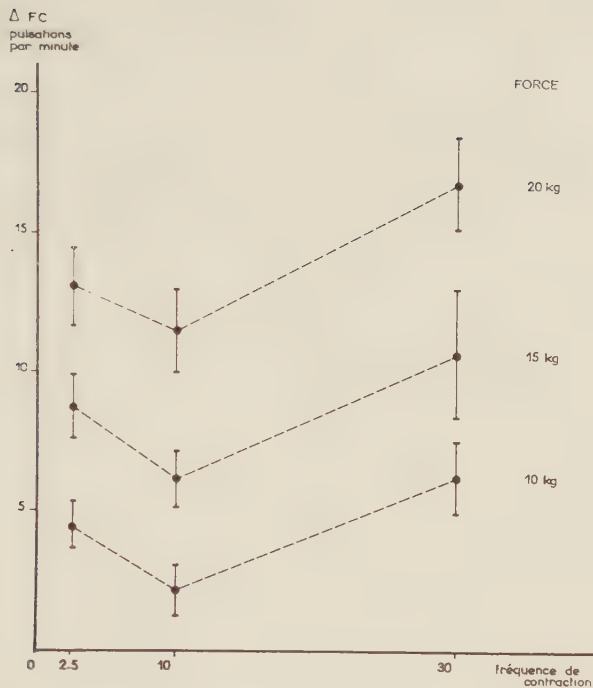


Fig. 16

BICEPS BRACHIAUX; AUGMENTATION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE EN

FONCTION DE LA FREQUENCE DE CONTRACTION

L'augmentation de fréquence cardiaque n'est pas en relation linéaire avec la fréquence de contraction, et la fréquence de contraction de 10/mn apparaît la plus économique.

cardiaques et la consommation d' O_2 enregistrées, ainsi qu'il vient d'être dit.

III - COMPARAISON ENTRE LA CONSOMMATION D'OXYGENE ET LA FREQUENCE CARDIAQUE AU COURS DU TRA- VAIL STATIQUE INTERMITTENT.

Les résultats précédents ont montré que les variations du coût énergétique et de la fréquence cardiaque au cours du travail statique intermittent ne sont pas strictement identiques, mais que d'une manière générale, la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque augmentent avec la force mise en jeu et varient presque parallèlement entre elles suivant la fréquence de contraction. Cette analogie des résultats permet de constater une synergie constante entre les adaptations respiratoires et circulatoires. Il nous faut donc rechercher la liaison entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque au cours d'un tel travail.

Bien qu'il existe une forte corrélation entre les valeurs obtenues au cours des deux périodes de 5 mn de travail, tant au point de vue de la consommation d'oxygène ($r = .90$) que de la fréquence cardiaque ($r = .92$), nous n'avons tenu compte que des valeurs relevées au cours de la 2ème période de travail. En effet, la 1ère période correspond à l'établissement de la dette d'oxygène et d'un nouveau plateau pour la fréquence cardiaque, c'est une phase d'adaptation respiratoire et circulatoire qui se fait probablement en un temps variable pour ces deux éléments; un état constant pour ces deux fonctions n'est sûrement réalisé que dans la deuxième période de 5 mn de l'exercice musculaire.

Si l'on considère les valeurs absolues de ces deux catégories de résultats, la corrélation est relativement faible puisque la valeur du coefficient de Bravais-Pearson a été trouvée égale à .54. Ceci tient au fait que les valeurs indivi-

duelles de repos sont soumises à une certaine fluctuation.

C'est pourquoi, nous avons considéré les augmentations de la consommation d'oxygène et de la fréquence cardiaque par rapport au repos. Dans ce cas, nous avons obtenu une valeur de ce coefficient nettement supérieur (.74). Mentionnons que pour la première période de travail le même coefficient n'est que de .65 .

Il semble donc qu'il existe une corrélation assez bonne entre les deux variables et il ressort de l'examen de la figure 17 que l'augmentation moyenne de la fréquence cardiaque peut être rapportée à l'augmentation moyenne de consommation d'oxygène. Pour l'ensemble de l'expérimentation, le rapport est de 9,16 et il est indiqué par la pente de l'axe de la corrélation. Les différentes valeurs de ce rapport

$$\frac{V_{O_2}}{F C}$$

c'est à dire le nombre de ml d'oxygène consommé par pulsation supplémentaire, en fonction de la force exercée et de la fréquence de contraction sont données dans le tableau IX.

TABLEAU IX

Fréquence de contraction	Force mise en jeu	$\frac{\Delta V_{O_2}}{\Delta F C}$
2,5/mn	10 kg	7,16
	15 kg	7,09
	20 kg	8,60
10/mn	10 kg	17,25
	15 kg	9,27
	20 kg	8,36
30/mn	10 kg	8,64
	15 kg	8,56
	20 kg	7,48

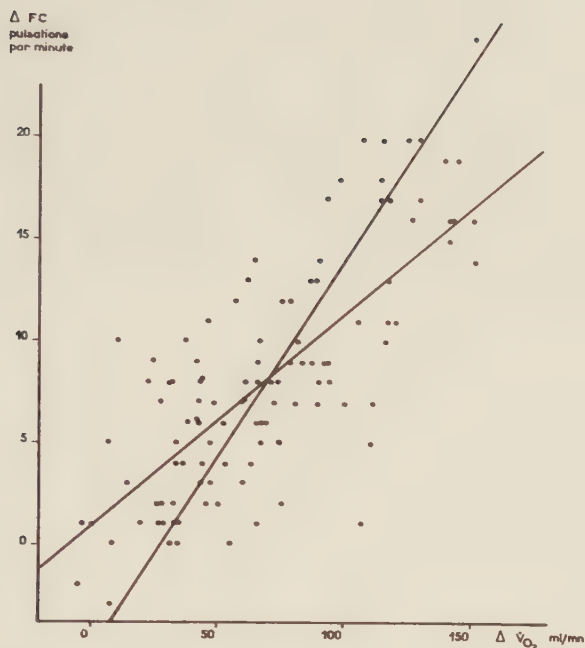


fig. 17

BICEPS BRACHIAUX

CORRELATION ENTRE L'AUGMENTATION DE LA FREQUENCE

CARDIAQUE ET L'AUGMENTATION DE LA CONSOMMATION D'OXYGENE

Droites de regression liant l'augmentation de fréquence cardiaque et l'augmentation de consommation d'oxygène pour les différentes fréquences et forces de contraction étudiées.

$$(r = .74) \quad \frac{\Delta V_{O_2}}{\Delta F_c} = 9,16$$

Comme le montrent les valeurs obtenues, ce rapport reste relativement constant si l'on excepte le cas de la fréquence 10/mn à une force de 10 kg pour lequel, d'ailleurs, le nombre de mesures simultanées de la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène est restreint.

D I S C U S S I O N

Dans ce chapitre, nous abordons d'un point de vue critique la technique utilisée et l'appréciation de l'intensité du travail effectué dans nos expériences. Puis, sont envisagés : le coût du travail statique intermittent effectué par un groupe musculaire localisé, la comparaison entre deux groupes musculaires différents, les modifications de la fréquence cardiaque et les valeurs de "l'oxygène pulse".

I - DISCUSSION METHODOLOGIQUE

a - Le dispositif mécanique.

L'étude d'un travail statique local exige des conditions expérimentales bien définies, notamment en ce qui concerne la constance de la force exercée, de la position du sujet et de l'angulation des bras de levier.

La technique que nous avons utilisée réalise ces conditions de façon assez stricte. Elle est probablement plus analytique que celle utilisée par BEDFORD et coll. (1933) : cet auteur fait effectuer par les deux membres supérieurs une poussée intermittente sur un ressort; il constate alors un déplacement du point d'application de la force de 6 mm par contraction; mais il étudie un travail réalisé par un ensemble de muscles sans tenter de le localiser à un groupe musculaire défini, aussi sa technique est moins stricte : elle ne prévoit pas une fixité des segments de membres dans une position constante d'une contraction à l'autre et d'une expérience à l'autre, elle entraîne une contraction de posture et ne permet pas une exactitude dans la force exercée

particulièrement dans le cas de contractions de courte durée (1 s) et où la force mise en jeu est faible (environ 15 kg). Le dispositif que nous avons utilisé permet une localisation du travail sur un groupe musculaire défini, une automatisation de celui-ci et une plus grande précision dans son exécution.

1 - La force mise en jeu est demeurée constante au cours d'une contraction et d'une contraction à l'autre.

2 - La position des bras de levier a varié au niveau des points d'application de la force de quelques millimètres autour de la position définie (en moyenne 4,9 mm par contraction); un léger travail dynamique a pu ainsi se trouver réalisé; mais il faut noter que, s'il s'agit d'un travail actif et résistant dans le cas de contractions à fréquence rapide, il n'est que résistant dans le cas de contractions à faible et moyenne fréquence.

3 - Les co-contractions mises en jeu par le maintien de la position de travail ont été réduites par la présence d'appuis au niveau des articulations (v. technique); la palpation des muscles au cours du travail n'a permis de constater qu'une contraction des muscles de l'épaule pour le membre supérieur. Et si les valeurs de consommation d'oxygène que nous avons obtenues peuvent donc être un peu supérieures à celles qui seraient constatées en éliminant toute co-contraction, celles-ci ne peuvent expliquer toutefois la nette différence entre le coût du travail du biceps et celui du triceps (LAVILLE et coll. 1961). En effet, il est probable que le coût des co-contractions mises en jeu au cours du travail du biceps brachial n'est pas 3 à 4 fois plus grand que celui des co-contractions mises en jeu au cours du travail du triceps sural.

b - La mesure de la consommation d'oxygène.

L'intensité des contractions est restée généralement modérée, bien que le pourcentage de force maximum étudié dans le cas du triceps sural

apparaît élevé (entre 33,7 et 53,5 %). En effet, la force maximum des triceps suraux (177 kg) que nous avons trouvée est faible par rapport à celle admise habituellement : elle peut s'expliquer par le fait que la position dans laquelle elle a été mesurée est inconfortable et que la flexion des genoux entraîne un raccourcissement des muscles.

Pour doubler les masses musculaires mises en jeu, l'étude a porté sur les groupes musculaires droit et gauche correspondants. Cependant, l'augmentation de consommation d'oxygène mesurée au cours du travail est restée faible (la plus basse étant de l'ordre de 30 ml/mn). Aussi, pour diminuer l'erreur expérimentale, le travail a été précédé d'une longue période de repos (35 mn), les expériences ont été répétées 3 fois sur chaque sujet pour toutes les forces et les fréquences de contraction considérées, aux mêmes heures de la journée et loin des repas.

II - APPRECIATION DE L'INTENSITE DU TRAVAIL EFFECTUE DANS NOS EXPERIENCES.

Le type de travail étudié n'intéresse qu'un groupe musculaire limité : fléchisseurs de l'avant-bras et muscles de la flexion plantaire du pied; il est considéré comme un travail local suivant la définition qu'en ont donnée SCHERRER et MONOD (1960). La force mise en jeu est d'intensité modérée et dans ces conditions expérimentales le travail a été effectué sans épuisement local, ce qui est objectivé soit par le mécanogramme, soit par l'électromyogramme; aucune augmentation de l'activité électrique des muscles mis en jeu et aucune diminution de la tension exercée n'a été constatée entre le début et la fin du travail; les phénomènes subjectifs éprouvés par les sujets au cours de la période de travail n'ont pas dépassé, même au cours des durées de contractions les plus longues et lorsque les forces les plus élevées ont été appliquées, le stade de gêne locale; celle-ci qui apparaît nettement avant le seuil d'épuisement dans le travail statique continu, disparaît d'ailleurs complètement pendant la période

de repos intercalaire. Il faut cependant remarquer que la durée totale de la période de travail n'a pas dépassé 10 minutes.

Le niveau critique d'un travail a été défini par SCHERRER et coll. (1953 - 54) comme étant le niveau au-dessous duquel ce travail peut être effectué pendant un temps très long. Ces auteurs ont développé la notion de puissance critique correspondante en travail dynamique et, définissant le seuil d'épuisement local comme le moment où le travail ne peut être effectué à sa puissance initiale, ils ont établi une relation mathématique entre le temps limite et le travail limite. La notion de force critique a également été étudiée en travail statique continu (MONOD, 1956) et une relation mathématique a aussi été établie entre le temps limite et la force limite. Mais aucune étude n'a encore précisé le niveau de force critique pour le travail statique intermittent. De ce fait, il est difficile de savoir si le travail envisagé ici est nettement en-dessous ou au voisinage de celui-ci et la seule comparaison possible ne peut être faite qu'avec le travail statique continu; ainsi, la force la plus élevée étudiée par nous pour un biceps brachial, 10 kg, qui correspond à 25,7 % de la force maximum, entraîne au bout de 3 mn 1/2 de maintien continu un épuisement local (MONOD, 1956) et la durée du maintien étudiée par nous est d'environ 5 mn sur une période de travail de 10 mn comportant des phases de contraction et des repos intercalaires de durées égales; mais le stade d'épuisement local qui devrait être ainsi atteint, n'a pas été constaté sur les enregistrements; on peut donc supposer que la force critique en travail statique intermittent est nettement plus élevée que la force critique en travail statique continu, qui est évaluée à 15 - 20 % de la force maximum; et on sait en effet que le fait d'intercaler des pauses au cours d'un travail statique de durée prolongée, augmente considérablement la capacité de travail des muscles mis en jeu (ROHMERT, 1960; ATZLER, WACHOLDER, MULLER in Scherrer et Monod, 1960); il y a donc un grand intérêt à préciser cette notion de force critique

en travail statique intermittent; mais il faut remarquer cependant que la difficulté vient du fait qu'on doit alors tenir compte, non seulement de la force et de la durée de chaque contraction, mais aussi de la proportion entre la durée de la phase active et celle du repos intermédiaire.

III - COUT D'UN TRAVAIL STATIQUE EFFECTUE PAR LES BICEPS.

1 - Définition du rendement statique.

La définition de rendement en travail statique ne peut être faite qu'en introduisant la notion de durée de contraction. Nous l'avons exprimé en ml d'oxygène par kilo de tension maintenu pendant 1 s ($VO_2/kg\ s$).

Mais le coût global d'une contraction statique se compose du coût de la phase de maintien et du coût de la phase de mise en tension et de la phase de relâchement. Si on peut éliminer le coût de ces deux dernières phases, on obtient le coût exact du kg maintenu pendant une seconde, qui correspond au rendement de la contraction isométrique et isotonique pure. Nous avons fait l'hypothèse que le coût de ces deux phases de mise en tension et de relâchement était représenté par le coût d'une contraction à la fréquence de 30/mn et nous l'avons retranché du coût d'une contraction de 3 s et de 12 s. Pour confirmer que ce calcul est possible, il faudrait montrer que le coût de ces deux phases de mise en tension et de relâchement reste constant quelle que soit la durée de la contraction. On peut concevoir que pour des contractions de durée comprise entre 3 et 6 s environ, le coût de la seconde de maintien est constant. Notre hypothèse pourrait alors être vérifiée si on montrait qu'en éliminant le coût des deux phases extrêmes, le coût de la phase de maintien est en relation linéaire avec la durée de celle-ci, entre ces limites.

2 - Rôle de la force.

Les études

antérieures concernant le travail statique intermittent ont porté généralement sur les groupes musculaires des membres supérieurs; mais l'imprécision des techniques utilisées et des résultats obtenus les rendent peu utilisables. Les résultats que nous avons obtenus confirment ceux de BEDFORD et coll. (1933), bien que, comme nous l'avons fait remarquer, cet auteur étudie un groupe musculaire moins systématisé que nous : en particulier, nous avons retrouvé une augmentation plus rapide de la consommation d'oxygène que la force mise en jeu lorsque celle-ci croît (v. fig. 18).

Le type de courbe obtenue par nous et par BEDFORD en travail statique intermittent est à rapprocher des courbes de consommation d'oxygène en fonction de la puissance en travail dynamique local (SCHERRER, MONOD et SOULA, 1960), comme le montre la fig. 19; il faut noter cependant que les puissances étudiées sont au voisinage de la puissance critique. Mais, étudiant les forces plus faibles que BEDFORD, les résultats obtenus par nous montrent que le rendement statique reste pratiquement constant jusqu'à un certain seuil qui a été trouvé aux environs de 7 kg 500 pour chaque biceps. L'explication qui peut être avancée est l'existence d'une diffusion d'activité à des muscles voisins, en particulier aux muscles de l'épaule et du tronc (mais respectant les muscles antagonistes, v. MONOD et SCHERRER, 1960), au-delà de ce seuil, au-dessous de 7 kg 500 par biceps, les fixations ligamentaires et osseuses et la masse corporelle par son inertie étant suffisante pour annuler la force tendant à déplacer le sujet, les co-contractions sont alors éliminées; au-delà de ce seuil, une immobilisation plus stricte est nécessaire et les muscles péri-scapulaires entrent en jeu; à mesure que la force croît, les co-contractions augmentent et s'étendent, entraînant une fixation du tronc qui devient rigide et une poussée des pieds sur leur

appui; cette diffusion des co-contractions entraîne alors une baisse du rendement statique.

Mais on peut aussi se demander si le maintien d'une force élevée par un groupe musculaire localisé en dehors de toute co-contraction, n'est pas moins économique, c'est à dire si cette augmentation plus rapide du coût de la contraction en fonction de la force n'est pas propre au groupe musculaire lui-même et dû à une baisse de son efficience. L'hypothèse d'ailleurs d'une baisse de rendement lorsque la force croît, même pour des forces peu élevées, ne peut être éliminée.

3 - Rôle de la durée des phases de travail.

a - En considérant comme possible le calcul qui permet d'évaluer par différence avec le coût d'une contraction à la fréquence de 30/mn, le coût de la seule phase de maintien aux deux autres fréquences de contraction, il apparaît que le coût des deux phases extrêmes d'une contraction statique est relativement plus élevé que le coût de la phase de maintien pure (hypothèse déjà formulée par JOHANSSON, 1901); et on peut supposer que c'est la seule phase de mise en tension qui est coûteuse, la phase de relâchement n'étant qu'un phénomène de décontraction passive ou ne représentant qu'un travail résistant minime; et celui-ci est connu comme peu coûteux en travail dynamique. Ceci indique qu'un rythme de contraction trop rapide, donc comportant de nombreuses mises en tension, n'est pas économique; et le coût plus élevé des contractions à la fréquence de 30/mn qui ne comportent plus de phase de maintien, le confirme.

b - Le rendement de la contraction isométrique et isotonique pure, obtenu par le calcul décrit plus haut, apparaît alors plus élevé à la fréquence de contraction de 10/mn qu'à celle de 2,5/mn. Une contraction trop longue semble alors plus coûteuse.

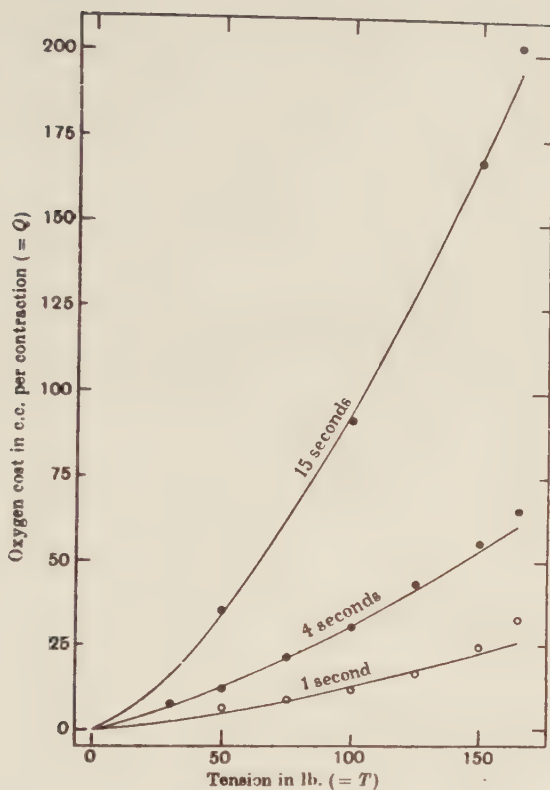


Fig. 18

CONSOMMATION D'OXYGENE EN FONCTION DE LA FORCE MISE EN JEU

(d'après Bedford et coll. 1933)

Travail statique intermittent effectué par les membres supérieurs. Trois durées de contraction (1s, 4s et 15s), la consommation d'oxygène croît plus vite que la force mise en jeu.

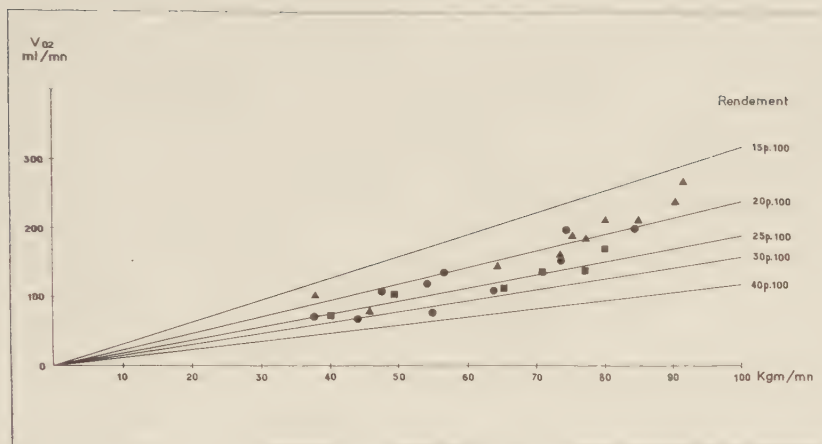


fig. 19

RENDEMENT D'UN TRAVAIL DYNAMIQUE EFFECTUE PAR DES

SUJETS ENTRAINES

(d'après SCHERRER et coll. 1960)

Coût énergétique en fonction de la puissance au cours d'un travail dynamique bilatéral des fléchisseurs de l'avant-bras, chez trois sujets.

La diminution du rendement est manifeste au-delà de 80 kgm/mn valeur de la puissance critique des muscles étudiés.

On peut expliquer le faible coût de la seconde de maintien lorsque les contractions durent 3 s et sont séparées par des périodes de repos de durée égale, comme l'ont fait récemment ASTRAND et coll. (1960). Ces auteurs ont montré une lactacidémie plus faible pour un travail dynamique général, il est vrai, lorsque celui-ci était effectué par périodes de courte durée (10 s de travail suivies de 20 s de repos). Or, le travail en anaérobiose est considéré comme plus coûteux (50 %) que le travail en aérobiose (CHRISTENSEN 1950); la faible lactacidémie notée par ces auteurs est attribuée au fait que le muscle utilise ses réserves d'oxygène fixées sur la myoglobine, celles-ci se révélant suffisantes lorsque le travail est très fractionné; et un fractionnement du travail local plus poussé que ne le permet un travail général est peut être encore plus économique.

Si l'on considère le rendement statique, c'est à dire le coût moyen de la seconde de contraction avec ses trois phases, la différence entre les fréquences de contraction de 10/mn et de 2,5/mn apparaît très faible; ce qui peut être expliqué par le fait qu'elle est masquée par un nombre de mises en tension plus élevé dans le cas de la fréquence de contraction de 10/mn. Mais on peut remarquer que les résultats obtenus par la fréquence cardiaque confirment cette différence.

On peut donc supposer l'existence d'un rythme économique qui ne soit ni trop lent pour que le travail ne s'effectue pas en anaérobiose, ni trop rapide pour que le coût de la mise en tension ne soit pas trop important.

L'existence d'un tel rythme économique paraît alors en contradiction avec les résultats

de BEDFORD et coll. (1933) qui trouve une relation linéaire entre la durée et le coût d'une contraction statique (v. fig. 20).

4 - Le faible coût du travail statique.

Les valeurs de consommation d'oxygène due au travail restent relativement faibles par rapport aux forces mises en jeu. Ceci apparaît encore plus nettement si on peut éliminer toute contraction, le coût de la phase de mise en tension et si le travail s'effectue en aérobiose. Les résultats obtenus par nous concernant le coût du travail effectué par les triceps suraux confirment ce faible coût du travail statique (de 31 à 124,3 ml/mn pour des forces de 50 à 90 kg). On peut rapprocher les valeurs que nous avons obtenues de celles concernant le coût du maintien de la posture debout par rapport à la posture assise; celui-ci peut être estimé aux environs de 31 ml/mn (v. BOUISSET, MONOD et PELOSSE, 1959); mais l'appréciation de la force mise en jeu par les triceps suraux dans le maintien de la posture érigée est difficile à établir : JOSEPH et NIGHTINGALE (1952) l'estiment à 32 kg et SMITH (1957) trouve qu'elle peut varier de 54 à 162 kg. Il faut cependant remarquer que nos résultats portent sur des contractions intermittentes, le travail réalisé étant alors moitié moindre, mais que par contre, dans le maintien de la posture debout, les triceps suraux ne sont pas seuls à être mis en jeu (HANTZ et WALSH, 1959).

5 - Importance de la dette dans le travail statique intermittent.

Les valeurs de la dette que nous avons constatées restent modérées : elles correspondent en moyenne à 5,1 % de la consommation spécifique de travail pour les biceps et à 2,2 % pour les triceps. On peut remarquer que les valeurs absolues de celle-ci varient peu en fonction de la durée

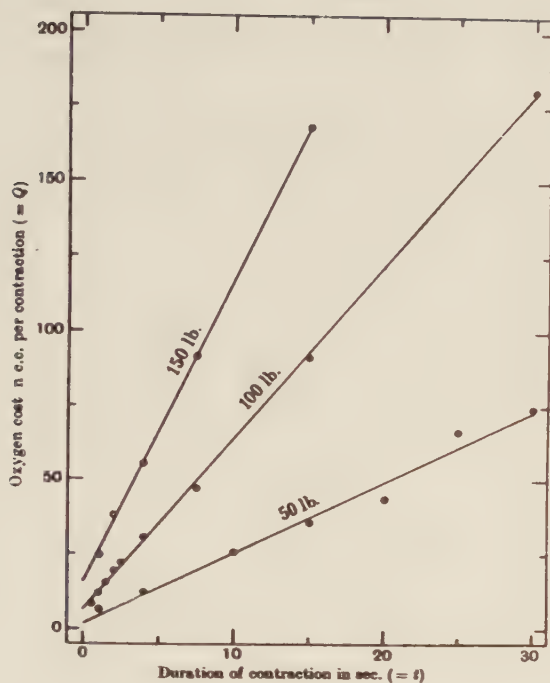


Fig. 20

CONSUMMATION D'OXYGENE EN FONCTION DE LA DUREE DE CONTRACTION

(d'après Bedford et coll., 1933)

Travail statique intermittent effectué par les membres supérieurs. Trois forces mises en jeu (50 - 100 et 150 livres). La consommation d'oxygène est en relation linéaire avec la durée de contraction, ce qui est en contradiction avec nos résultats qui montrent l'existence d'un rythme économique.

des contractions, mais s'élèvent un peu pour les forces les plus élevées, le pourcentage par rapport à la consommation spécifique restant relativement constant. Ces faibles valeurs de la dette en travail statique intermittent s'opposent à celles constatées par CLARKE (1960) en travail statique continu. Cet auteur, étudiant des contractions statiques des quadriceps pendant 5 mn, constate une dette nettement plus importante (de 16 à 33 % de la consommation spécifique de travail) pour des forces mises en jeu inférieures à celles étudiées par nous (de 15 à 25 kg environ). Il trouve d'autre part, une augmentation proportionnellement plus grande de la dette que de la consommation d'oxygène au cours du travail, lorsque la force croît.

On peut expliquer cette différence de résultats par le fait que dans le travail statique intermittent, les repos intercalaires limitent l'établissement de la dette.

IV - COMPARAISON ENTRE DEUX GROUPES MUSCULAIRES DE FONCTION DIFFERENTE.

Le coût du travail statique effectué par les biceps brachiaux et muscles synergiques d'une part, et les triceps suraux d'autre part diffère sensiblement comme nous l'avons vu dans le chapitre des résultats. Trois faits vont permettre de préciser cette différence :

1 - Le coût du travail effectué par ces deux groupes musculaires n'apparaît pas varier de manière identique en fonction de la force mise en jeu.

Dans le cas du biceps l'augmentation de consommation d'oxygène n'est en relation linéaire que jusqu'à un certain seuil au delà duquel elle croît plus vite que la force.

Dans le cas du triceps, pour les forces étudiées, le coût de la contraction est en rela-

tion linéaire avec la force mise en jeu; mais il faut remarquer que la courbe change probablement d'allure pour des forces inférieures à celles étudiées par nous, comme nous l'avons fait remarquer au chapitre des résultats; ce dernier point est difficilement vérifiable en raison de la faible consommation spécifique de travail pour des forces inférieures à 50 kg (moins de 30 ml/mn).

2 - Pour permettre une comparaison plus exacte du coût du travail statique entre ces deux groupes musculaires, il faut tenir compte de deux facteurs : d'une part, la force réelle exercée par le muscle, d'autre part la masse musculaire mise en jeu.

a - Le rapport des bras de levier correspondant à chaque groupe musculaire permet de connaître la force exercée par le muscle au niveau du tendon à partir de la force mesurée à son point d'application.

Il est estimé à 2,3 pour le triceps sural (d'après CASTEX, VANDERVAEL, 1956) et à 4 pour le biceps brachial et muscles synergiques (MULLER, 1940).

Cette première correction fait déjà apparaître un coût relativement moindre dans le cas du triceps sural que dans le cas du biceps brachial pour une même force exercée (v. fig. 21 A).

b - Le deuxième élément à considérer est l'importance des masses musculaires mises en jeu.

Elles sont de l'ordre de 660 g pour les biceps brachiaux et les muscles synergiques et de 1550 g pour les triceps suraux (FROHSE et FRANKEL, 1908).

En tenant compte de ces deux facteurs on peut rapporter la force exercée par chaque groupe musculaire à une unité commune de masse musculaire permettant une comparaison plus exacte entre les deux groupes considérés de ce qu'on a proposé

A. 11

4

t
i
m
l
r
p
l
d

t
F
t
l
e

r
c
v
f

(
2
3
4

1
2
3

précédemment comme étant le rendement du travail statique.

La figure 21, B et les deux courbes de la figure 22 qui expriment le coût du kg maintenu pendant une seconde en fonction de la force exercée par 100 g de muscle, font apparaître un rendement statique nettement plus bas dans le cas des biceps brachiaux (pour des forces correspondantes exercées par 100 g de muscle le coût pour les biceps est de 4 à 5 fois plus élevé que celui pour les triceps).

On peut noter d'autre part, une baisse importante du rendement statique des biceps brachiaux lorsque la force dépasse 7 kg 500/100 g de muscle.

Cette différence très nette entre les deux groupes musculaires ne peut s'expliquer seulement par l'existence de co-contractions plus importantes dans le cas du biceps brachial, ni par des différences de longueur du muscle ou du nombre des fibres qui les constituent, ce dernier fait jouant au contraire en faveur du triceps sural.

On peut alors supposer qu'elle est le témoignage de l'existence d'une adaptation de ces muscles, les biceps ayant une fonction phasique prédominante alors que les triceps, qui ont un rôle essentiel dans le maintien de la posture debout peuvent être considérés comme ayant une fonction plus particulièrement tonique.

3 - Bien que les volumes de la dette restent faibles, on peut noter que pour une même fréquence de contraction et malgré des forces par unité de masse musculaire en moyenne plus importante, celles constatées dans le cas du triceps sont nettement plus faibles que celles du biceps : elles varient entre 6,5 et 39,7 ml pour le triceps sural et 18,1 et 69,4 ml pour le biceps brachial ; et cette différence se retrouve dans les pourcentages de la dette par rapport aux consommations spécifiques de travail qui sont très

voisines pour les forces étudiées (2,2 % pour les triceps suraux et 4,8 % pour les biceps brachiaux à la fréquence de contraction de 2,5/mn). Ce fait est en faveur de l'hypothèse de cette adaptation fonctionnelle émise précédemment.

V - LA FREQUENCE CARDIAQUE AU COURS DU TRAVAIL STATIQUE.

1 - Modification de la fréquence cardiaque.

L'augmentation de fréquence cardiaque qui a été constatée au cours du travail, pour les différentes forces mises en jeu et rythmes de contraction, reste modérée. Elle se fait dès le début du travail, comme l'ont montré quelques dépouillements effectués minute par minute et reste en plateau pendant toute sa durée. Ceci confirme d'ailleurs que le stade d'épuisement local n'a pas été atteint, celui-ci entraînant une accélération cardiaque (MONOD et SCHERRER, 1960).

On peut noter, par ailleurs, l'existence d'une grande analogie des résultats entre l'augmentation de consommation d'oxygène et l'augmentation de fréquence cardiaque:

a - Les courbes obtenues en fonction de la force mise en jeu sont très semblables.

b - La différence entre les courbes des différents rythmes de contraction se retrouve et confirme l'économie du rythme de 10/mn par rapport aux deux autres rythmes considérés.

c - La corrélation entre la valeur de ces résultats est relativement bonne ($r = .74$).

Ceci montre donc la synergie constante de l'adaptation de ces deux fonctions au cours du travail statique intermittent.

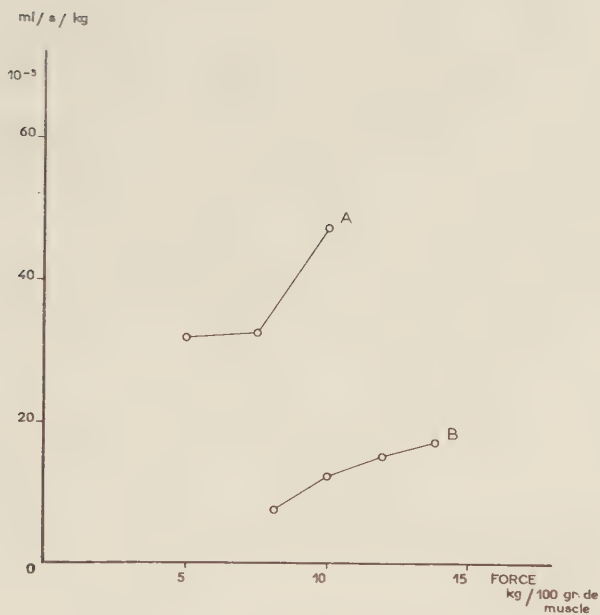


fig. 22

COMPARAISON DU COUT DU TRAVAIL STATIQUE INTERMITTENT
 ENTRE LE BICEPS BRACHIAL ET LE TRICEPS SURAL

En abscisse : consommation d'oxygène par kg seconde maintenu au niveau du tendon.

En ordonnée : force rapportée au niveau du tendon et exercée par 100 gr de muscle.

A : Biceps brachial

B : Triceps sural.

2 - Valeur de l' "oxygen-pulse".

Le rapport du nombre de millilitres d'oxygène consommés par pulsation supplémentaire au cours du travail a fait l'objet de plusieurs études concernant essentiellement le travail dynamique; moins nombreuses sont celles concernant le travail statique continu.

En travail dynamique général les valeurs trouvées par différents auteurs varient notablement :

17	pour LINDHARD (1915)
entre 18 et 37	pour HENDERSON et coll. (1927)

En fait, les études les plus récentes permettent d'admettre couramment les chiffres de 25 à 30:

29	pour BERGGREN (1950)
25	pour WYNDHAM (1959)
25	pour ASTRAND (1959)
22 à 27	pour HANSEN et MAGGIO (1960)

En ce qui concerne le travail statique, ce rapport n'a été étudié à notre connaissance que pour les contractions continues et pour des forces modérées.

COGSWELL et BROWNER (1955) obtenant des contractions continues pendant 45 minutes par stimulation électrique de groupes musculaires localisés trouvent une valeur moyenne de 5,8. HANSEN et MAGGIO (1960) pour un travail statique continu des membres supérieurs, obtiennent les chiffres de 8,1 et 10,0.

La plus faible valeur (environ 4) est constatée dans le cas du maintien de la posture debout par rapport à la posture assise (v. BOUISSET MONOD et PELOSSE, 1959). Mais ce chiffre bas est

dû au rôle de l'orthostatisme.

Le chiffre moyen que nous avons trouvé (9,16) pour le travail statique intermittent se situe donc plus près des valeurs concernant un travail statique continu que de celles concernant un travail dynamique; il est à noter que ce rapport, pour les différentes fréquences et les différentes forces étudiées par nous, reste relativement constant; et le travail effectué à la fréquence de contraction de 30/mm qui s'apparente de très près au travail dynamique ne diffère pas, en ce qui concerne ce rapport, du travail statique continu. Mais il faut remarquer que les valeurs trouvées pour le travail dynamique concernent un travail général; on ne peut donc situer ce chiffre en travail statique intermittent par rapport à celui d'un travail dynamique localisé.

C O N C L U S I O N S

Notre étude porte sur le coût énergétique et les modifications de la fréquence cardiaque liés au travail statique intermittent effectué par deux groupes musculaires différents : le groupe du biceps brachial et celui du triceps sural.

I - Au cours de 124 expériences effectuées par 8 sujets, la consommation d'oxygène due au travail a été mesurée en circuit ouvert et calculée en tenant compte du métabolisme de repos et de la dette d'oxygène.

Les contractions statiques intermittentes ont été réalisées à l'aide d'un dispositif réduisant au minimum le déplacement des leviers osseux; les mesures ont porté sur des périodes de 10 minutes durant lesquelles des phases de contraction ont alterné avec des phases de repos de durées égales. La force mise en jeu a été déterminée à son point d'application sur le segment de membre à l'aide d'une jauge de contrainte. La fréquence cardiaque a été enregistrée par électrocardiographie.

II - Les résultats ont montré que pour une même durée de contraction, la relation entre la consommation d'oxygène et la force mise en jeu n'est linéaire que lorsque celle-ci est peu élevée. Au delà d'une certaine valeur, la consommation d'oxygène croît plus vite que la force; si on appelle Rendement statique le rapport :

Travail statique en kg s

Consommation d'oxygène en ml

on peut dire que ce rendement baisse lorsque la force croît.

On pourrait éventuellement expliquer ce fait par une diffusion de l'activité musculaire à mesure que la force de contraction augmente.

III - Pour une force de contraction donnée, le rendement statique semble optimal lorsque les périodes de travail sont de l'ordre de 3 à 5 secondes; si la contraction est plus brève, le coût de la mise en tension, qui paraît élevé, diminue le rendement; si la contraction est plus longue un processus anaérobie peut être incriminé.

IV - Afin d'étudier l'économie de la contraction statique et de permettre la comparaison entre différents groupes musculaires, il est nécessaire, soit de rapporter la force de contraction au niveau du point d'insertion du muscle, soit d'apprécier le coût énergétique d'une même tension développée par unité de masse musculaire.

En procédant ainsi, on constate que le maintien pendant un temps donné d'une même force au niveau du tendon bicipital et du tendon d'Achille est 3 à 4 fois plus coûteux pour le biceps brachial que pour le triceps sural. Cette différence de Rendement Statique s'accroît encore si on considère le coût du maintien d'une force identique pour 100 g des muscles biceps brachial et triceps sural.

La dette d'oxygène est par ailleurs moins élevée pour le triceps sural.

V - Dans le travail statique intermittent l'augmentation de fréquence cardiaque suit celle de la consommation d'oxygène. La valeur de l'"oxygen-pulse" est relativement basse; ce qui peut être rattaché soit au fait qu'il s'agit d'un travail local, soit à la nature statique de celui-ci.

Vu, le Président de Thèse
Professeur BARGETON

Vu, le Doyen de la Faculté
Professeur L. BINET

Vu et permis d'imprimer
Le Recteur de l'Académie de Paris
J. SARRAILH

BIBLIOGRAPHIE

ASTRAND - P.O. (1952)

Experimental studies of physical working capacity
in relation to sex and age.

Munksgaard. Copenhagen, 171p.

ASTRAND - I. et P.O. et RODAHL - K. (1959)

Maximum heart rate during work in older men.

J. Appl. Physiol., 14, 562-566.

ASTRAND - I., ASTRAND - P.O., CHRISTENSEN - E.H. et
HEDMAN - R. (1960)

Myoglobine as an oxygen-store in man.

Acta Physiol. Scand., 48, 454-460.

BATES - J.A.V. et COOPER - J.V. (1954)

A simple electronic circuit for measuring voltage
time integrated.

J. Physiol., Lond. 123, 28-29.

BEDFORD - T., VERNON - H.M. et WARNER, C.G. (1933)

The influence of static effort on the respiration
and on the respiratory exchange.

J. Hyg., 33, 118-150.

BERGGREN - G. et CHRISTENSEN - H. (1950)

Heart rate and body temperature as indices of
metabolic rate during work.

Arbeitsphysiol. 14, 255-260.

BORNSTEIN - A. et POHER - E. (1903)

Ueber den respiratorischen Stoffwechsel bei sta-
tischer Arbeit. Pflüg. Arch. 95, 146-156.

BOUISSET - S., MONOD - H. et FELOSSE, - J.M. (1959)

La posture debout. Effets physiologiques et nui-
sances. Le travail Humain, 22, 159-162.

CATHCART - E.P., BEDALE, E.M. et Mc CALLUM - G. (1923)

The static effort.

J. Physiol. Lond. 57, 161-174.

CHAUVEAU - A. et TISSOT - J. (1896)

L'énergie dépensée par le muscle, en contraction statique, pour le soutien d'une charge d'après les échanges respiratoires.

C.R. Acad. Sc. Paris, 123, 1236-1241.

CHRISTENSEN, E.H. et HOGBERG - P. (1950)

The efficiency of anaerobical work.

Arbeitsphysiol. 14, 249-250.

CLARKE - D.H. (1960)

Energy cost of isometric exercise.

Research Quart, 31, 3-6.

COGSWELL - R.C. et BROWNER - W.J. (1955)

Effects of non-voluntary, electrically stimulated, muscular activity on pulse rate, blood pressure and O₂ uptake.

J. Appl. Physiol., 8, 19-21.

COMROE - J.R., FORSTER - R.E., DUBOIS - A.B., BRISCOE - W.A. et CARLSEN - E. (1959)

Le poumon. Traduction française

Presses Scientifiques internationales, 265 p.

DEJOURS - P. (1959)

La régulation de la ventilation au cours de l'exercice musculaire chez l'Homme.

J. Physiol. Paris, 51, 163-261.

DOUGLAS - C.G. et HALDANE - J.S. (1912)

The capacity of the air passages under varying physiological conditions.

J. Physiol. Lond. 45, 235-238.

DOUGLAS - C.G. (1955)

The development of experimental methods for determining the energy expenditure of man.

Proc. Nutr. Soc. 15, 72-77.

FROHSE - F. et FRANKEL - M. (1908)

Die Muskeln des menschlichen armes.
Handb. Anatomie des Menschen. Bardeleben, II,
B.G. Fischer, Gena, 693p.

FRUMERIE - K. (1913)

Ueber das Verhältniss des Ermüdungsgefühls Zur
CO₂- Abgabe bei statischer Muskularbeit.
Skand. Arch. Physiol., 30, 409-440.

HANSEN - O.E. et MAGGIO - M. (1960)

Static work and heart rate.
Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol.
18, 242-247.

HOUTZ - S.J. et WALSH, - F.P. (1959)

Electromyographic analysis of the function of the
muscles acting on the ankle during weight bearing
with special reference to the triceps surae.
J. Bone Joint Surg. Amer. Ed. 41 A, 1469-81.

JOHANSSON - J.E. (1901)

Untersuchungen über die Kohlensäureabgabe bei
Muskelstätigkeit.
Skand. Arch. Physiol., 11, 273-307.

JOHANSSON - J.E. et KORAEN - G. (1902)

Untersuchungen über die Kohlensäureabgabe bei sta-
tischer und negativer Muskelstätigkeit.
Skand. Arch. Physiol., 13, 229-250.

JOSEPH - J. et NIGHTINGALE - A. (1952)

Electromyography of muscles of posture : leg
muscles in males.
J. Physiol. 117, 484-491.

JOSEPH - J. (1960)

Man's posture electromyographic studies.
Ch. Thomas, Springfield, Illinois, 88p.

KAYSER - CH. (1947)

Physiologie du travail et du sport
Paris. Hermann Edit. 1 vol. 264p.

KAYSER - CH. (1948)

La fatigue dans le travail statique.
Méd. Educ. Phys. Sport, 1, 63-91.

KEKTSCHEEW - K. et BRAITZEWA - L. (1930)

Material zur physiologischen Untersuchung der
statischen Arbeit.
Arbeitsphysiol., 2, 526-540.

LAVILLE - A., MONOD - H., SCHERRER - J. et SOULA - C. (1961)

La consommation d'oxygène dans le travail statique
de groupes musculaires différents.
J. Physiol. Paris 53, (sous presse).

LINDHARD - J. (1912)

On the static action of the triceps surae with
some remarks on the mechanical effect of flat-foot.
Scand. Arch. Physiol. 27, 295-303.

LINDHARD - J. (1915)

Ueber das Minuten volum des Herzens bei Ruhe und
die Muskularbeit.
Pflüg. Arch. Physiol. 161, 233-383.

LINDHARD - J. (1920)

Untersuchungen über statische Muskularbeit.
Skand. Arch. Physiol. 40, 145-196.

LUFT - K. (1956)

L'analyse par absorption infra-rouge et son appli-
cation au dosage de l'oxyde de carbone.
Rev. Techn. Luxemb. 48, 75-80.

LUPTON - H. (1923)

An analysis of the effects of speed on the mecha-
nical efficiency of human muscular movement.
J. Physiol. 57, 337-353.

MARGARIA R., MESCHIA G. et MARRO F. (1954)

Détermination de la consommation d' O_2 au moyen de l'oxygène-mètre de PAULING.

J. Appl. Physiol. 6, 776-780.

MARSCHAK - M. (1931)

Eine Untersuchung über den Gaswechsel und über die Milchsäure und Alkalireserve im Blut bei statischer Arbeit.

Arbeitsphysiol. 4, 1-19.

MONOD - H. (1956)

Contribution à l'étude du travail statique.

Thèse Méd. Paris, 124 p.

MONOD - H., MOYNIER - R., SCHERRER - J. et SOULA - C.
(1956)

Etude de la pression artérielle et du pouls dans le travail statique.

J. Physiol. Paris 48, 662-666.

MONOD - H. et SCHERRER - J. (1957)

Capacité de travail statique d'un groupe musculaire synergique chez l'Homme.

C.R. Soc. Biol., Paris 161, 1358-1362.

MULLER - E.A. (1940)

Sauerstoffbedarf-und-Versorgung bei statischer Muskelarbeit beim Menschen und im Tierversuch.

Arbeitsphysiol. XI, 59-72.

PAULING - L., WOOD - R.E. et STURDIVANT - J.H. (1946)

An instrument for determining the partial pressure of oxygen in a gas.

J. Amer. Chem. Soc. 68, 795-798.

ROHMERT - W. (Von) (1960)

Ermittlung von Erholungspausen für statische Arbeit des Menschen.

Int. Z. angew. Physiol. 18, 123-164.

- SCHERRER - J., SAMSON - M. et SOULA - C. (1953)
 La notion du travail-limite du muscle et le seuil de la fatigue.
 C.R. Soc. Biol., Paris 147, 1993-1996.
- SCHERRER - J., SAMSON - M. et PALEOLOGUE - A. (1954)
 Etude du travail musculaire et de la fatigue.
 I-Données ergométriques obtenues chez l'homme.
 J. Physiol., Paris 46, 887-916.
- SCHERRER - J. et SAMSON - M. (1955)
 Etude de la force musculaire au cours et à la suite d'un travail dynamique.
 J. Physiol. Paris, 47, 272.
- SCHERRER - J. et MONOD - H. (1960)
 Le travail musculaire local et la fatigue chez l'Homme.
 J. Physiol., Paris 52, 419-501.
- SCHERRER - J., BOURGUIGNON - A, et MONOD - H. (1960)
 La fatigue dans le travail statique.
 Rev. Pathol, Gén. 60, 357-367.
- SCHERRER - J., MONOD - H. et SOULA - C. (1960)
 Appréciation de l'apport énergétique et rendement dans le travail musculaire local.
 Wychowanié fizyczne i sport, 4, 429-438.
- SHEPHARD - J.W. (1957)
 A critical examination of the DOUGLAS bag technique
 J. Physiol. Lond. 127. 515-524.
- SMITH - J.W. (1957)
 The force operating at the human ankle joint during standing.
 J. Anat. 91, 545-564.

VANDERVAEL - F. (1956).

Analyse des mouvements du corps humain.

Maloine Edit. Paris 151p.

Desoer, Liège.

WACHOLDER - K. (1928)

Willkürliche Haltung und Bewegung insbesondere
im Lichte elektrophysiologischer Untersuchungen.
Ergebn. Physiol. 26, 568-775.

WACHOLDER - K. (1930)

Die Arbeitsfähigkeit des Menschen in ihrer
Abhängigkeit von der Funktionsweise des Muskel-
und-nervensystems.

Handb. Norm. Pathol. Physiol. J. Springer, Berlin
15, 587-642.

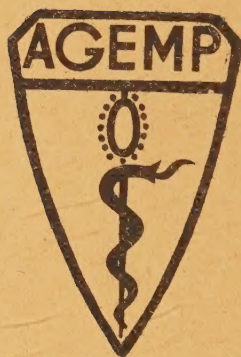
WYNDHAM - C.H., STRYDOM - N.B., MARITZ - J.S., MORRISON
J.F. et POTGIETER - J.P. et Z.U. (1959)

Maximum oxygen intake and maximum heart rate
during strenuous work.

J. Appl. Physiol. 14, 927-936.

TABLE DES MATIERES

	Page
I - INTRODUCTION.....	1
Rappel historique.....	2
II - TECHNIQUE.....	5
Méthode d'étude et technique.....	8
Principe d'utilisation.....	12
Protocole expérimental.....	17
III - RESULTATS	
Consommation d'oxygène au cours du travail statique intermittent.....	21
A) Travail statique effectué par le biceps brachial.....	23
B) Travail statique effectué par le triceps sural.....	31
La fréquence cardiaque au cours du travail statique.....	35
A) Variation de la fréquence cardiaque en fonction de la force de contrac- tion.....	36
B) Fréquence de contraction et fréquence cardiaque.....	38
Comparaison entre la consommation d'oxy- gène et la fréquence cardiaque au cours du travail statique intermittent.....	40
IV - DISCUSSION.....	43
Discussion méthodologique.....	45
Appréciation de l'intensité du travail effectué dans nos expériences.....	47
Coût du travail statique effectué par les biceps.....	49
Comparaison entre deux groupes musculaires de fonction différente.....	54
La fréquence cardiaque au cours du travail statique.....	57
V - CONCLUSION.....	61
VI - BIBLIOGRAPHIE.....	66



AGEMP
POLYCOPIE

8, rue Dante

PARIS-Ve

Téléphone : ODÉon 58-90